



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Morænelers Geotekniske Egenskaber

Apparater og Målemetoder

Jacobsen, Moust

Publication date:
1994

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Jacobsen, M. (1994). *Morænelers Geotekniske Egenskaber: Apparater og Målemetoder*. Aalborg Universitetscenter, Inst. for Vand, Jord og Miljøteknik, Laboratoriet for Fundering. Uden navn

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- ? Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- ? You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- ? You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

MOUST JACOBSEN

**MORÆNELERS
GEOTEKNISKE
EGENSKABER**

Apparater og målemetoder 2

Kopi af Licentiatafhandling fra 1967



1994

LABORATORIET FOR FUNDERING
AALBORG UNIVERSITET
SOHNGAARDSHOLMSVEJ 57 . 9000 AALBORG

MOUST JACOBSEN

MORÆNELERS GEOTEKNISKE EGENSKABER

Apparater og målemetoder **2**

Kopi af Licentiatafhandling fra 1967

Apparater og Målemetoder
(Bind II af morænelers deformationsegenskaber)

af

Moust Jacobsen
civilingeniør

Geoteknisk Institut

København 1967.

B I N D II

Apparater og målemetoder

Indholdsfortegnelse

	side
Indledning	3
Afsnit 1 Laboratoriemålinger	5
1. Klassifikationsforsøg	5
2. Permeabilitetsforsøg	7
3. Konsolideringsforsøg	13
4. Simple trykforsøg	28
5. Triaxialforsøg	33
Afsnit 2 Målinger i marken	58
6. Prøveoptagning	58
7. Håndvingeforsøg	59
8. Kapillarspændingsmålinger	60
9. Pladeforsøg	63
Referencer	73
Desuden 39 bilag og 16 fotosider	

I N D L E D N I N G

Under arbejdet med måling af morænelers deformationsegenskaber blev det klart, at hovedårsagen til uoverensstemmelser mellem de i laboratoriet målte egenskaber og de i marken ved pladeforsøg og sætningsobservationer bestemte egenskaber måtte søges i laboratorieudstyret.

Det er derfor naturligt at omtale alle apparattekniske og forsøgstekniske detaljer samlet, idet disse sikkert også har interesse for måling af andre jordarters egenskaber.

Det apparatur, der normalt anvendes, er udviklet med henblik på temmelig svage og eftergivelige jordarter. Efterhånden er de hårde jordarter blevet påført så store fundamentalsbelastninger, at det også er nødvendigt at kende disses deformationsegenskaber. Udviklingen har derfor medført, at disse apparater anvendes langt ud over den grænse, der oprindeligt må være fastsat af apparaternes konstruktører. En kalibrering af disse apparater med messingklodser i stedet for jordprøver viser, at apparaternes egendeformationer er af samme størrelsesorden som morænelers deformationer. Da disse deformationer ikke er reproducerbare, er forsøgenes værdi ringe.

Konstruktionen af nye konsoliderings- og triaxialapparater har betydet, at en korrektion af de målte resultater normalt er unødvendig. Det nye triaxialapparats egendeformationsmodul svarende til normal prøvehøjde er 500.000 t/m^2 ; konsolideringsapparatets er langt større.

Et andet vigtigt resultat er udnyttelsen af de såkaldte "glatte" trykhoveder og reduceret prøvehøjde, hvorved ensformige spændings- og deformationstilstande opnås i hele prøven. Kriteriet for, at trykhovederne er "glatte", er, at de målte brudspændinger ikke afhænger af prøvehøjden, og at prøven deformeres cylinderformet. Det er vist, at dette opnås, hvis højden er lig med diametren.

Endvidere er omtalt simple trykforsøg, permeabilitetsforsøg og pladeforsøg, idet der er gjort rede for nogle væsentlige fejlkilder, og dernæst hvordan disse undgås.

Konklusionen af dette arbejde er, at hvis forsøgene udføres omhyggeligt og korrekt, er der kun meget små uoverensstemmelser

tilbage mellem de resultater, der opnås i de forskellige forsøgstyper. Det viser sig endvidere, at skalaeffekter, der alene beror på apparaternes udstrækning, er meget små. Uoverensstemmelser mellem beregnede og målte sætninger ligger hermed væsentligt i en helt utidssvarende beregning af spændingsforløbet i jorden under fundamenter.

Der vil i dette bind blive gjort rede for hver forsøgstype for sig, for så vidt som en udvikling har fundet sted under dette arbejde. Der redegøres normalt først for det apparatur, der var disponibelt ved begyndelsen af dette arbejde, derefter for de fejl, der blev fundet, og endelig gives en beskrivelse af det apparatur, der er udviklet på dette grundlag.

LABORATORIEMÅLINGER

1. KLASSEKATIONSFORSØG

Til klassifikationsforsøg regnes forsøg til bestemmelse af vandindhold, rumvægt, kornvægtfylde, sigte- og slemmekurver, plasticitetsgrænser, glødetab og kalkindhold.

Af disse skal kun nøjere omtales vandindhold, rumvægt og kornvægtfylde, da det især er disse, der har interesse for sammenligningen af forskellige morænelerers deformationsegenskaber.

Om kornvægtfylden er kun at bemærke, at metoden er meget reproducerbar, og at spredningen er meget lille. Der er målt en standardafvigelse på middeltallet på 0.004 ved 22 forsøg med samme jordart (Kratbjerg moræneler).

Vandindholdet bestemmes med stor sikkerhed, men må dog tages med forbehold, når der foregår for meget mellem vådvejning og tørvejning. Ved forsøg kan man derfor ikke lægge særlig stor vægt på vandindholdet før forsøget og dermed på begyndelsesporotal og mætningsgrad. Begyndelsesporotallet bestemmes bedst ved vandindholdet af intaktsprøver, der er helt friske, under forudsætning af vandmætning. (Metoden er dog ikke god).

Rumvægtsbestemmelser kræver en volumenmåling. Tidligere havde man kun een metode, nemlig at skære et passende stykke af en prøve fra et prøverør. Det er imidlertid en ganske utilstrækkelig metode for moræneler, hvor prøven næsten aldrig får samme areal som prøverøret. Metoden indeholder muligheden for grove fejl (forkert længdemåling). For en større forsøgsserie på Kratbjerg er yderpunkterne således en rumvægt på 2.05 t/m^3 og 2.68 t/m^3 . Mætningsgraderne varierede fra 0.65 - 1.45! Hvis der ikke er grove fejl i målingen, måles et prøvevolumen altid for stort. Rumvægten og mætningsgraden bliver derved for små, pore-tallet for stort.

For konsolideringsforsøg gælder, at prøvevolumenet kendes godt tilsidst i forsøget, og at man derfor ved at tage hensyn til den mindre højde kan få temmelig nøjagtige værdier af slutpore-tal og mætningsgrad.

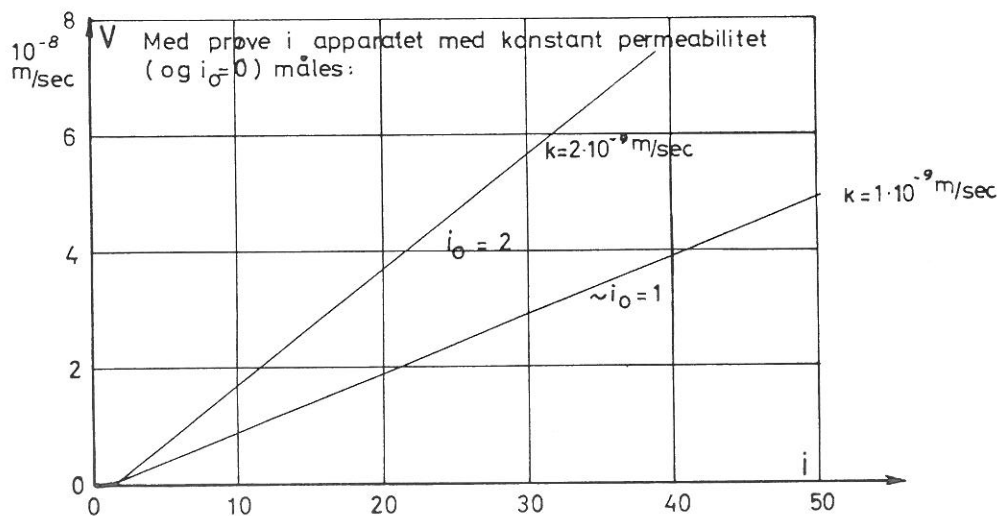
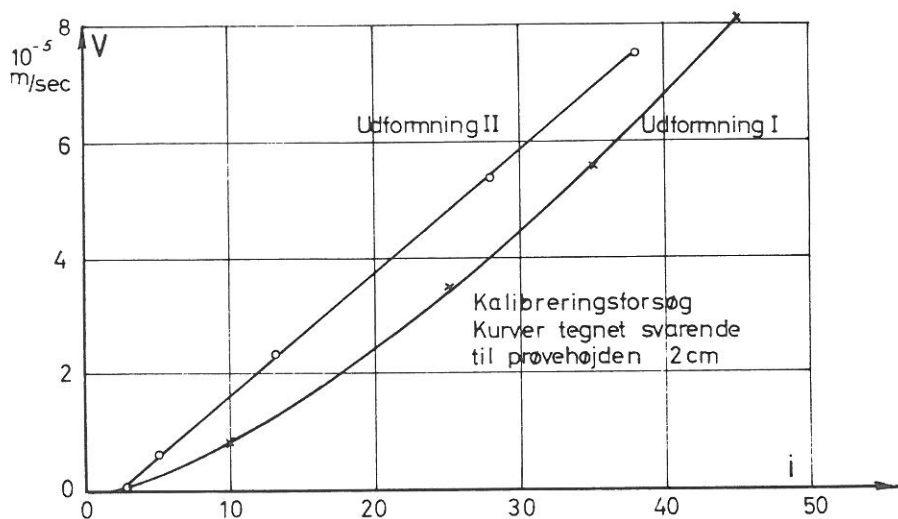
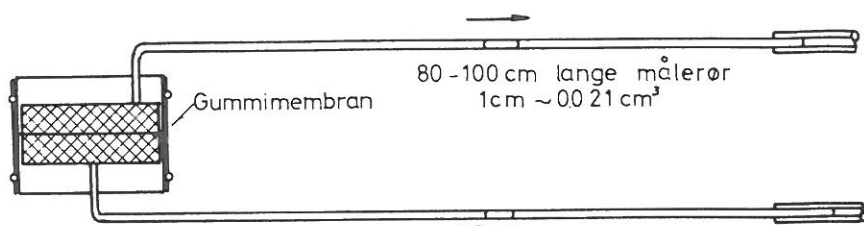
Man har nu taget en metode i brug, der giver en korrekt volumenbestemmelse, den såkaldte klumporetalsbestemmelse. Der be-

nyttes nogle klumper fra prøvematerialet, og volumenet bestemmes ved at måle opdriften på klumpen, når den sænkes ned i en vædske, der ikke forbinder sig med porevandet, og hvis rumvægt er mindre end jords (f.eks. Triclorethylen). Metodens svaghed består i, at det ikke er selve prøven, man måler på, men et par tilfældige klumper af forsøgsmaterialet.

Man kan dog benytte selve prøven, hvis denne er så stor, at der kan skrælles noget af før forsøget. Der skal dog på denne måde vejes en ekstra gang.

I dette arbejde forsøges ikke at benytte de på almindelig måde fundne poretal og mætningsgrader. Der benyttes udelukkende klumpporetallet e_k , og da som et gennemsnit for hele lerarten.

Kalibreringsforsøg for gennemstrømningsapparat



2. PERMEABILITETS F O R S Ø G

Permeabiliteten bestemmes normalt af konsolideringsforsøg, men det er hensigtsmæssigt at måle permeabiliteten direkte, da teorien er temmelig kompliceret; blandt andet forudsættes Darcys lov at gælde.

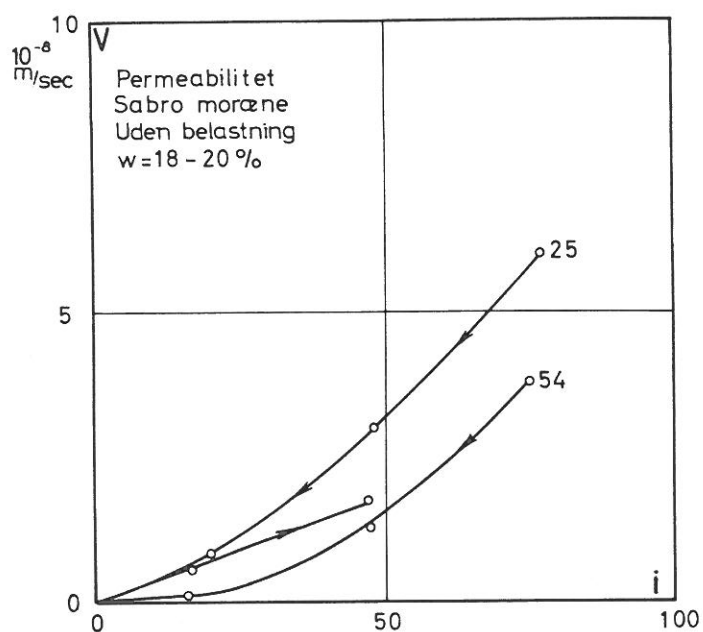
Målingen foretages altid ved en parallelstrømning af vand gennem jordens porer. Prøven må derfor placeres mellem to filtersten og indesluttet i en gummimembran. For at hindre strømning af vand mellem prøve og membran smøres prøvens sider ind i vaselin. Forholdet mellem prøvehøjde og diameter er normalt temmelig ringe (mindre end $\frac{1}{2}$).

Permeabiliteten bestemmes ved en måling af det gennemstrømmende vand. Det er en god metode at anvende et vandret liggende kapillarrør med en luftboble i. Sådant et rør kalibreres let mod et inddelt rør. Ved små permeabiliteter anvendes meget tynde rør. Man får let rør, hvor 1 cm³ vand giver en boblevandring på 5 m.

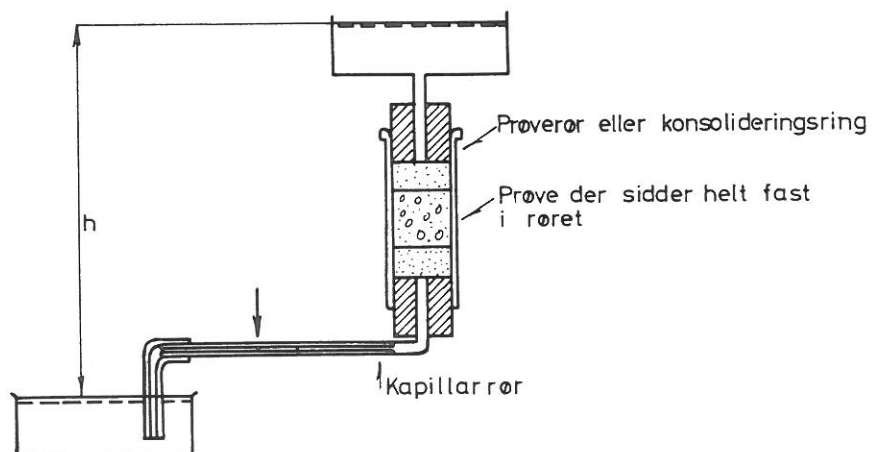
Denne måling indeholder den første fejlmulighed. Her vises som eksempel en af de opstillinger, der ikke blev benyttet. Der måles såvel den indstrømmende som den udstrømmende vandmængde, hvorved man får en kontrol på tætheden i systemet. Kapillarrørene er temmelig lange, men ikke særlig tynde (0.02 cm³ pr.cm). Før prøven skulle sættes i apparatet, blev der foretaget en opstilling med filtersten mod filtersten, og luftboblernes hastighed målt som funktion af potentialfaldet over systemet. Benyttes en tænkt prøvehøjde på 2 cm, svarende til prøvehøjden senere i forsøget, kan man optegne en kurve over apparatets egenpermeabilitet, som vist på midterste figur side 7. Det ses, at denne udformning af apparatet i sig selv indeholder muligheden for at måle en "tærskelgradient" i_0 . Der er vist virkningen af to udformninger af målesystemet.

Satte man i dette apparat en prøve, der opfyldte Darcys lov, ville man derfor måle en tærskelgradient i_0 , der ville være afhængig af gennemstrømningshastigheden og mindre end apparatets. Denne gradient vil derfor vokse med voksende permeabilitet. På nederste figur side 7 ses et eksempel herpå.

Tidligste permeabilitetsforsøg



Anvendt apparat



Eksemplet er sikkert temmelig gyldigt, idet kapillarrøret naturligvis vælges finere, hvis lerprøven er mindre permeabel. Dette kan alene ligge i ønsket om at opnå en overskuelig tid mellem aflæsningerne.

Resultatet viser, at målerøret skal være så kort som muligt, og de anvendte slanger så tykke og korte som muligt.

De første forsøg blev udført på Sabromoræneleret, og hele apparatet bestod af et prøverør, hvori prøven var vokset fast i tidens løb, eller en konsolideringsring, hvori sad en prøve, der havde været udført konsolideringsforsøg med. Der blev brugt sand for enderne som dræn, og der lukkedes med to gummirør med propper i. På side no.9 ses dette simple apparat afbildet. Af de opnåede resultater ses, at Darcys lov ikke er opfyldt, og at der også her kan defineres en tærskelgradient. Forsøget kan kun udføres ved meget små spændingsniveauer, og konsolideringen ved poretryksændringer er derfor så langvarig, at den næppe har været færdig, før målingen af vandgennemstrømningen har fundet sted. Spændingsniveauet bør derfor være så stort, at ændringer i poretrykket er af ringe betydning.

Det er endvidere af vigtighed, at der anvendes udkøgt vand for at hindre luft i at spærre ved overgang fra grove til finere porer. Hele systemet må evakueres for luft, f.eks. ved anvendelse af vacuum.

Disse to simple forsøg viser, at forkert forsøgsteknik vil give en ulineær sammenhæng mellem gradient og filterhastighed på en sådan måde, at det er muligt at definere en tærskelgradient. Hvis man derfor ikke i artikler om dette emne kan læse om den præcise forsøgsteknik, er det umuligt at vide, om der er nogen reel baggrund for en sådan måling af "tærskelgradienter".

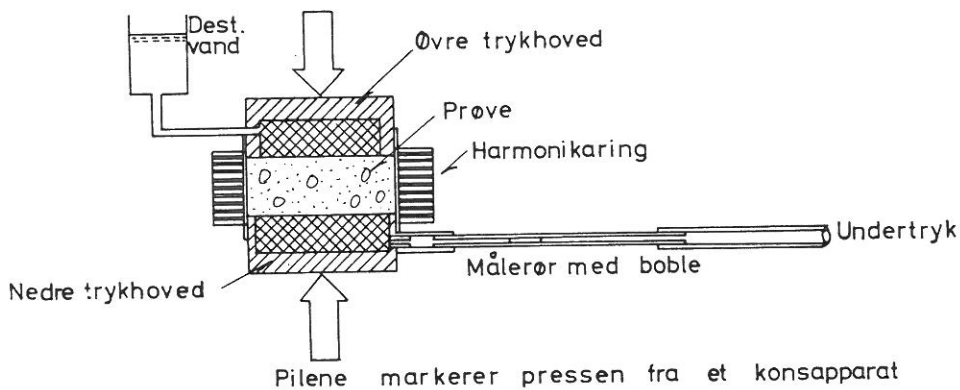
Kort kan siges,

at lange målerør giver små tærskelgradienter ($i_0 = 0-5$),
at lave spændingsniveauer let giver store tærskelgradienter ($i_0 = 20-30$).

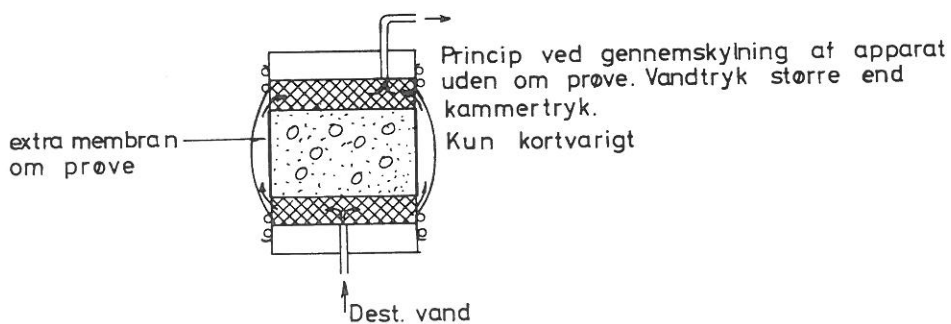
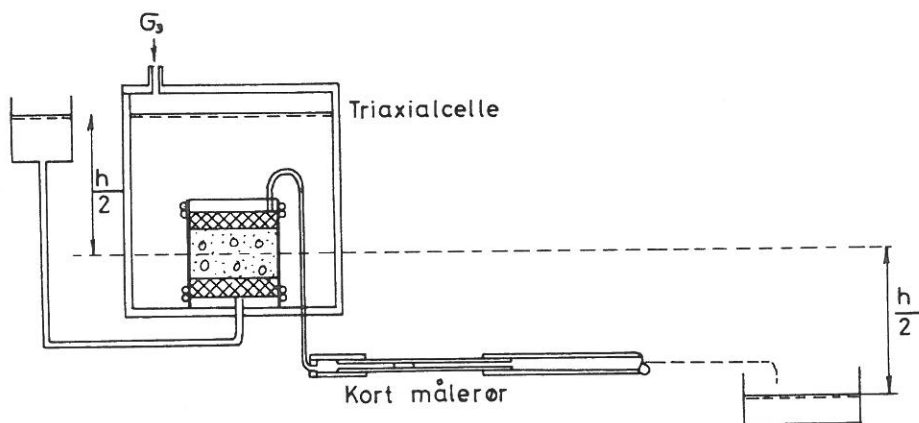
Spændingsniveauet frembringes lettest i et triaxialapparat ved et alsidigt tryk. Da forsøget er så tidsrøvende, er det dog en kostbar fremgangsmåde.

I forbindelse med konsolideringsforsøgene blev der konstrueret et apparat med "harmonikaring", der skulle gøre, at apparatfriktionen blev meget lille. Harmonikaringen bestod af en svær gummimembran indesluttet i tynde metalringe. Det blev opgivet

Det normalt benyttede gennemstrømningsapparat.



Apparat til undersøgelse af mætningsgradens indflydelse



at anvende apparatet til konsolidering, men det var helt velegnet til permeabilitetsforsøg. Belastningen påføres som i et normalt konsolideringsforsøg. Apparatet er vist skematisk på side no.11, og et billede ses på foto no.1. Det har den fordel, at strømmingen udelukkende kan fremkaldes af undertryk, således at eventuelle utætheder straks viser sig som luftbobler på udgangssiden. En måling foretages på moræneler på den måde, at vacuum vekslende med atmosfærisk tryk trækker luft ud af filtersten og slanger. Herefter gennemstrømmes prøven en tid, indtil der ikke viser sig flere bobler på udgangssiden. Apparatet er da tæt og systemet afboblet. Man kender dog ikke mætningsgraden. Denne del tager meget lang tid, specielt viser det sig svært at få apparatet tæt. Ved hver bestemmelse af gennemstrømningshastigheden måles der flere gange, og en systematisk variation i måleresultaterne viser, at konsolideringen for den nye gradient ikke er overstået. Først når en tilfældig variation er fundet, regnes målingen for afsluttet. Med dette apparat kan man måle den lodrette sammentrykning af prøven, og derved ved overgang fra eet spændingsniveau til et andet få en normal tidskurve, og dermed en kontrol på den normale beregningsmåde. Overensstemmelsen er helt tilfredsstillende.

Hvis forsøget udføres i en triaxialcelle, har man en mulighed for at måle mætningsgradens indflydelse, idet man er i stand til at gennemskylle hele det ydre system uden om prøven og herefter måle permeabiliteten inden en vandmætning af prøven ved lang tids gennemstrømning. Dannes der ved denne gennemstrømning kanaler i prøven, vil man få det samme billede af permeabiliteten, som hvis målerørene havde været for lange. Eventuelle kanaler må lukkes med et højt sidetryk.

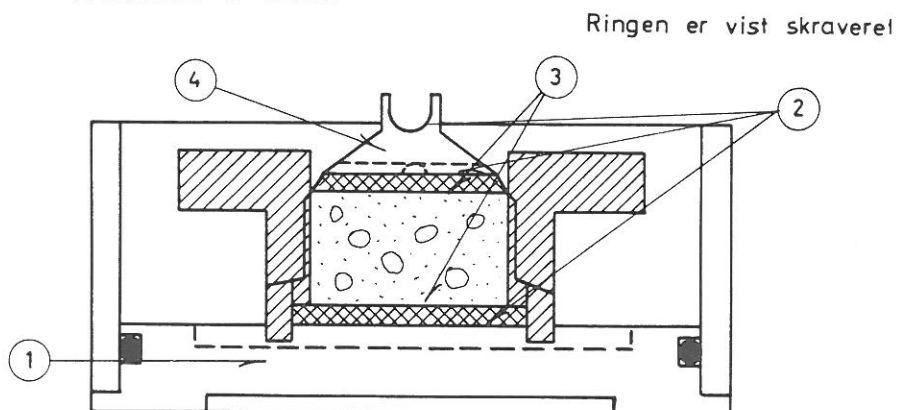
På side no.11 er skematisk vist, hvordan systemet skylles igennem uden om prøven. På selve prøven sidder en ekstra membran for at hindre erosion af prøvens sider.

3. K O N S O L I D E R I N G S F O R S Ø G

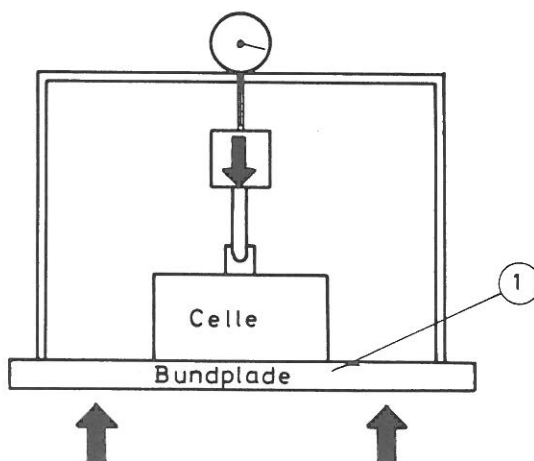
	side
Konsolideringsapparatets opbygning. Eksempel	15
Apparattekniske problemer	15
Det nye konsolideringsapparat	17
Forsøgstekniske problemer	19
Prøvens tildannelse. Udplatningseffekt.	20
Prøveforstyrrelsens indflydelse.	22
Friktion.	23
Beddingeffekt.	24
Maksimumspændingens indflydelse. (The stress history)	25
Specielle problemer ved det nye apparat.	26
Forsøgsproceduren	26

Konsolideringsapparat til bløde jordprøver.

Tværsnit i celle



Deformationsmålingsarrangement



Kraftpåvirkning angivet med sorte pile

Konsolideringsapparatets almindelige opbygning

Et konsolideringsapparat består af en presse, der almindeligvis virker efter vægtstangsprincippet, og en celle, der i princippet blot er en cirkulær ring med et stempel i hver ende. Pressen har ingen apparatteknisk interesse og vil derfor ikke blive omtalt nærmere.

På side no.14 ses cellen i et almindeligt konsolideringsapparat.

Prøven har et tværsnitsareal på 10 cm^2 og er 2 cm høj. Den er anbragt i en ring mellem to filtersten. Det hele står i en skål med vand, således at prøven kan opsuge vand herfra under forsøget. Trykket påføres øverste filtersten gennem et trykhoved, der er af messing eller plexiglas. I bunden af skålen og i trykhovedets plane del er neddrejet kanaler, der fungerer som dræn. Ringen er fastgjort til bundpladen. Andre systemer har en ring, der også er bevægelig i forhold til bundpladen. Dette system kaldes "svømmende ring" og nedsætter friktionen til den mindste af de to friktioner mellem ring og "stempler", foruden friktionen mellem prøve og stempel.

Man måler deformationen af prøven ved et måleursarrangement, der træder yderst på bundpladen og på belastningsarrangementet. (Se tegningen nederst på side no.14.

Apparattekniske problemer

De apparattekniske problemer kan deles op i

1. Deformationsmålingen
2. Beddingeffekt
3. Dræning

1. Deformationsmålingen

For det viste apparat gælder, at man foruden prøvens deformation og beddingeffekt også måler

1. deformationer i bundpladen,
2. knusning af urenheder i grænsefladerne mellem bundplade og bronzefilter, mellem bronzefilter og øvre trykhoved og mellem kugleskålen i øvre trykhoved og belastningsstang,

3. indtrængning af bronzefiltre i trykhoveder,
4. deformation af øvre trykhoved. For plexiglas betydelige deformationer og en elastisk eftervirkning på ca. 1 min. eller ca. dræntiden for en morænelersprøve!

Endelig er der en mulighed for ved skæv opstilling af apparatur at få åbning og lukning af sprækker i grænsefladerne.

Ved en kalibrering sættes en messingklods i apparatet i stedet for det ene bronzefilter for at få det samme antal grænseflader som i et forsøg (uden beddingeffekt).

Det har ikke vist sig muligt at opnå særlig tilfredsstillende overensstemmelse mellem kalibreringer foretaget før og efter forsøget. Kalibreringen er ikke reproducerbar og er derfor af tvivlsom værdi.

På andre apparatformer end den viste måler man noget mere direkte, i de mere avancerede måler man kun deformationen af prøven samt deformationer i to grænseflader og en kugle.

2. Beddingeffekt

Beddingeffekten fremkommer ved, at prøven indpresses i filterstenen. Denne effekt er naturligvis særlig stor under første belastningsgren, men det må formodes, at denne effekt iøvrigt udviser samme egenskaber som jords deformationsegenskaber: nogen reversibilitet med hysteresenatur.

For moræneler gælder det, at mange af kornene er af samme størrelsesorden som kornene i filterstenene, og man kan af den grund forvente, at beddingeffekten er særlig stor.

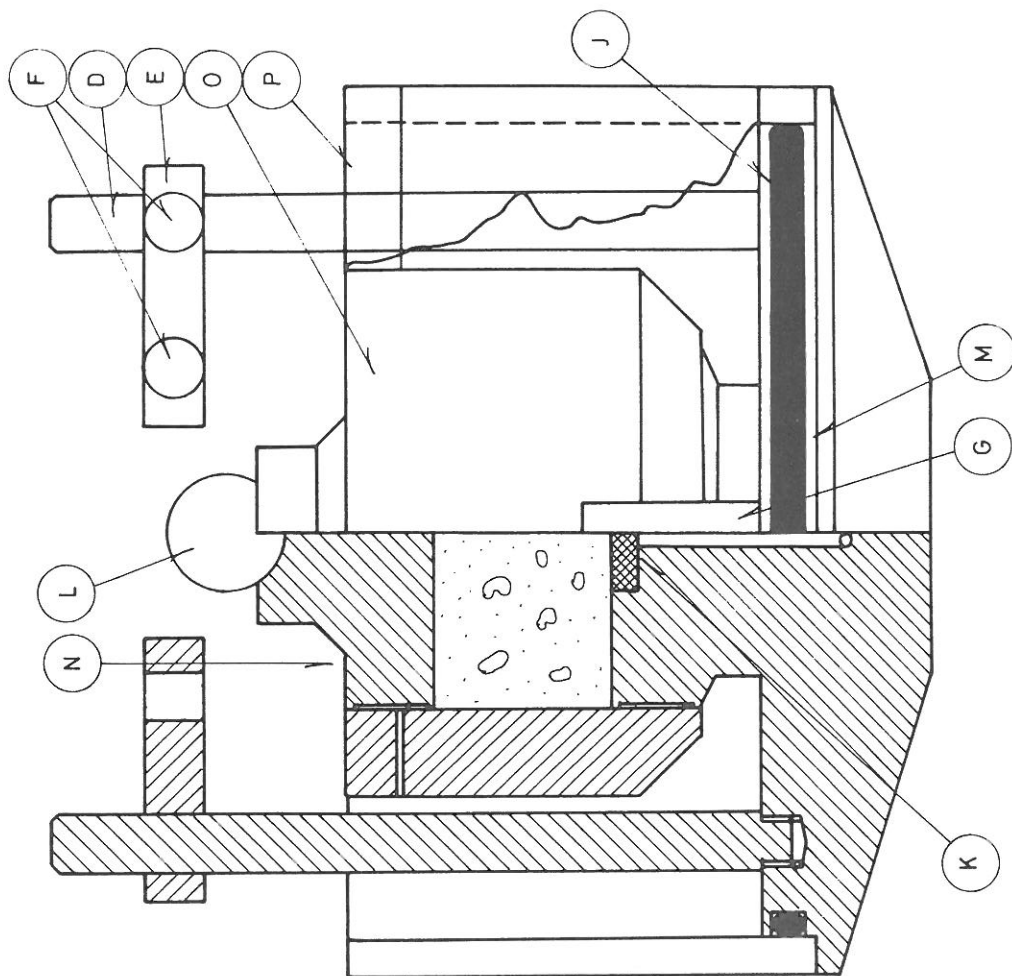
Der er det principielt forkerte ved de normale trykhoveder, at de har to funktioner, der modarbejder hinanden, nemlig

1. at overføre tryk, endda uden deformationer,
2. at dræne prøven.

Den helt gode løsning findes først, når disse to ting adskilles.

3. Dræning

Med den normale løsning på drænsproblemet er der højst problemer for jordarter, hvis permeabilitet er af samme størrelsesorden som apparatets egenpermeabilitet.



	Betegnelse	Tegn.no.
M	Bundplade	2
N	Stempel	3
O	Ring	4
D	Urholderstang	5
E	Urholder	6
F	Fingerskrue	7
G	Rør til vandmætning af dræn	8
P	Plexiglasring	9
J	O-ring R 208	
K	Filtersten 20" x 4	
L	Kugle 20 mm	

Nyt konsolideringsapparat.

Samlingstegning

Hvis man vælger et andet drænsystem, kan man ikke beregne jordartens permeabilitet på normal måde, men må udregne en ækvivalent drænvej, der ved indsættelse i formlerne giver den rette permeabilitet. Indflydelsen af apparatets egenpermeabilitet varierer ligeledes.

Er prøvens permeabilitet k , den ækvivalente drænvej $H_{\text{æqv}}$, filterstenens permeabilitet k' og tykkelsen d kan udregnes

$$\lambda = \frac{k' \cdot H_{\text{æqv}}}{k \cdot d}$$

er denne faktor over 10, er fejlen på k ifølge Bishop & Gibson under 10 %.

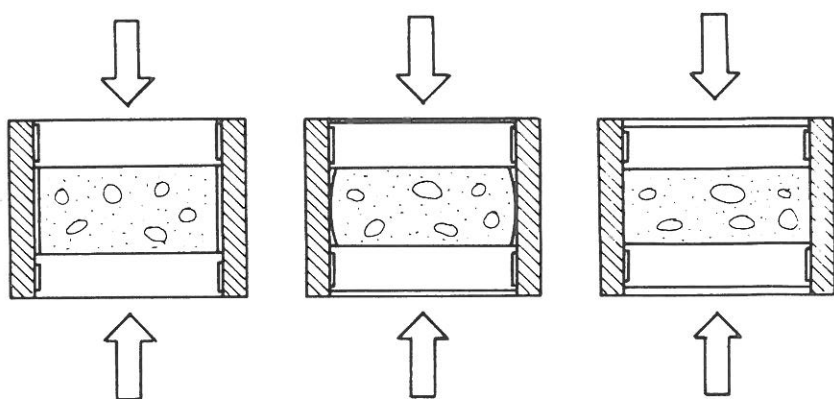
Det nye konsolideringsapparat

For at nedbringe apparatdeformationerne så meget som muligt er der konstrueret et nyt konsolideringsapparat, som er vist på side no.17 og foto no. 2. Det nedre trykhoved er udformet således, at deformationsmålingsarrangementet kan fastgøres direkte derpå, og således at en plexiglasring også kan fastgøres og sammen med trykhovedet danne den før omtalte skål. Der er to deformationsmåleure, der måler direkte på det øverste trykhoved. Kraften påføres via et åg gennem en kugle til øverste trykhoved. Det nedre trykhoved har på undersiden en afdrejning, således at berøringsfladen med pressen har næsten samme areal som prøven. Herved opnås, at "kraftlinierne" i understemplet skal forløbe parallelt eller en smule indad gennem trykhovedet, hvorved vinkeldejsninger i underpladen undgås. Det ses, at man ved denne løsning har undgået alle de før omtalte grænseflader.

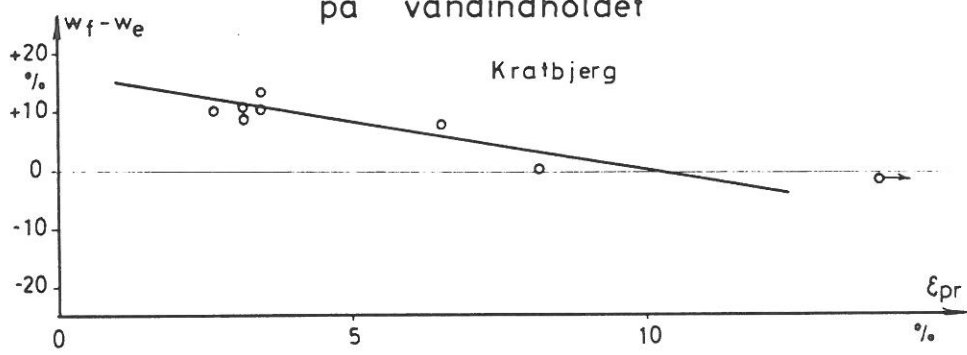
For at nedbringe beddingeffekten er filterstenen gjort meget lille, og der er kun filtersten i det nedre trykhoved. Filterstenens permeabilitet er for en ny sten målt til $0.5 \cdot 10^{-3}$ m/sek. og faktoren λ er dermed for moræneler i dette apparat $\lambda = 5000000$. Filterstenene bør dog alligevel udskiftes temmelig tit. De øvrige flader på trykhovederne indsmøres med gips, umiddelbart før prøven anbringes, således at prøven støbes fast til trykhovederne. For at vise at gipsen ikke deformeres måleligt, er der til kalibreringen af apparatet udført forsøg på en indstøbt gipsklump.

På bilag no.1 ses nogle kalibreringskurver for et par af de normale konsolideringsapparater (N6 og N9), et meget stort

Konsolideringsforsøgets primærgren



Primærdeformationens indflydelse
på vandindholdet



Vandindhold før forsøg w_f
— " — efter — " — w_e

konsolideringsapparat med prøveareal 158.3 cm^2 , hvis påvirkninger altså er ca. 16 gange så store og en temmelig dårlig kalibreringskurve for det nye konsolideringsapparat (med gipsprøve). I en enkelt kalibrering målttes ikke nogen deformation ved 120 t/m^2 !

Det nye apparat kan derfor regnes fejlfrit, hvad deformationsmålingen angår.

Til yderligere sammenligning er vist tre forsøg udført med samme procedure på en moræneler fra Kratbjerg i forskelligt apparatur. Apparatets indflydelse fordobler de målte deformationer (bilag no.2).

For at nedbringe indflydelsen af prøveforstyrrelser ved tildannelsen er prøvens diameter forøget til 6 eller 7 cm. Der udføres normalt forsøg med højde- bredde-forholdet 1:2.

De indvundne fordele betales med, at det ikke er umiddelbart muligt at beregne permeabiliteten ved disse forsøg, og at prøven får lejlighed til at suge noget vand fra gipsen under indsætningen.

Forsøgstekniske problemer

De følgende undersøgelser af konsolideringsapparatets virkemåde er alle udført på samme moræneler, den såkaldte Kratbjerg-moræne.

Prøvens tildannelse. Udplattungseffekten.

For et finkornet materiale tildannes prøven bedst ved, at ringen presses ned i prøven, der allerede er groft tildannet. Ringen er forsynet med et skær, der skræller det overflødige materiale bort. Ved denne tildannelsesmetode kan man opnå, at prøven får præcis samme diameter som ringen. Man kan derfor opnå, at konsolideringsforsøg med en fed, forbelastet ler (f.eks. Lillebæltsler) kan udvise fuld reversibilitet.

For et grovkornet materiale er det næsten umuligt at anvende denne metode. Prøven bliver normalt helt ødelagt. Man tildanner derfor disse prøver i et tildannelsesapparat og fører dem derefter over i konsolideringsringen. Man får derved en diameter, der er væsentlig mindre end ringens. Den allerførste del af et konsolideringsforsøg vil derfor nærmest være et simpelt, drænet trykforsøg med for lille prøvehøjde. Prøven vil deforme-

re sig tøndeforment, indtil ringen nås. Herefter vil ringen fremtvinge cylinderformen igen. Denne effekt vil bestemme første belastningsgrens form. På side no.19 ses dette skematisk afbildet. Prøven vil ved tilpas store spændinger få cylinderformen tilbage.

Ved omhyggelig prøvetildannelse kan man opnå en diameter, der kun er 0.5 mm mindre end ringens. Er ringen 70 mm, udgør undermålet altså ca. 0.7 %, med $\nu = \frac{1}{3}$, bliver $\epsilon_1 = 2$ % for udplatingen alene. Hertil kommer ca. 1 % konsolidering, inden forbelastningen nås.

For små prøver er effekten af prøvetildannelsen forholdsvis større, fordi tildannelsespræcisionen afhænger af kornstørrelsen.

Til illustration af dette forhold er vist et konsolideringsforsøg med en lille prøve ($A = 10 \text{ cm}^2$) bilag no.3 og med en stor konsolideringsprøve ($A = 158 \text{ cm}^2$) bilag no.4. Det er ikke forsøgt at udskære prøven så præcist som muligt, men kun som i almindelig praksis. Primærdeformationen er 6 % og 4 %.

Med det nye apparat indførtes et meget omhyggelig prøvetildannelse, og resultatet blev, at primærdeformationen kunne ned-sættes indtil ca. 2.5 %. På bilag no.5 er vist et forsøg med primærdeformationen på 3 %.

For at undersøge ringens betydning for begyndelsen af forsøgets primærgren udførtes et forsøg uden ring, bilag no.6. Forsøget fra bilag no.5 er vist punkteret. Det ses tydeligt, at ringen først træder i funktion, når cirka halvdelen af udplatingen er overstået, jfr. omstående beregning. Det svarer til, at prøvens midte netop rører ringen (stadie 2 side no.19).

Der er endvidere udført to forsøg med alt for små prøver. Prøvediametrene var 6.7 cm og 6.5 cm. Sættes $\nu = 1/2$, findes udplatingseffekten til ca. 9 % og ca. 15 %. Forsøgene er vist på bilag no. 7 - 8. Forsøg no.14 må på et længere stykke have været i brud.

Disse velkendte kurveformer indicerer altså en dårlig tildannet prøve. Disse kurver kan ikke sammenholdes med det ringløse forsøg, fordi der i disse forsøg er vandtilsætning (intet poreundertryk), og fordi spændingerne fra forsøgets start er udregnet på grundlag af det fulde areal.

Med de viste tre forsøg er der foretaget en aflastning til 1 t/m^2 og en genbelastning til 120 t/m^2 . Deformationerne er udregnet på grundlag af den nye højde efter primærgrenen. De tre

genbelastningsgrenene er vist på bilag no.9 og giver det overraskende resultat, at forsøget ikke er følsomt over for prøveudplætning!

For fuldstændighedens skyld skal dog nævnes, at vandindholdet ændres under primærgrenen afhængig af primærdeformationens størrelse. For de bedst tildannede prøver bliver vandindholdet mindre på genbelastningsgrenen, men for slet tildannede prøver kan jorden komme i en tilstand, hvor den opsuger vand, og hvor vandindholdet derfor er størst på genbelastningsgrenene.

På side no.19 er denne effekt vist. Ved behændighed kan man altså tildanne sin prøve så slet, at poretallet og vandindholdet på genbelastningsgrenene er de samme som i naturen. Dette er dog ikke forsøgt.

Disse undersøgelser over udplætningseffektens indflydelse på genbelastningsgrenene kan ikke tages som et almindeligt bevis for, at indflydelsen er negligciabel. Det må bemærkes, at jordartens dilatationsegenskaber spiller en vis rolle. Derfor bør prøvetildannelsen altid gøres så omhyggelig som muligt. Den omtalte moræne har et poretal på ca.0.34 og en vingestyrke på 20 t/m^2 .

Prøveforstyrrelsens indflydelse

De fleste af de forsøg, der omtales her, er udført på prøver, der er optaget med hånden som klumper på ca.14 x 14 cm eller med andre ord med en diameter dobbelt så stor som den senere anvendte prøves. Det har naturligvis kun kunnet lade sig gøre, fordi man i forvejen under pladeforsøgene var i den rette dybde.

Disse forsøg må derfor antages at have så lidt prøveforstyrrelse som muligt. Normalt er det nødvendigt at optage prøverne fra større dybder, d.v.s. med prøveoptager. Den anvendte prøveoptager har en diameter på 7 cm. 6 cm apparaterne er lavet specielt for at kunne få en prøve af fornuftige dimensioner ud af 7 cm prøverne. Ved disse forsøg, hvor der altså er skrællet $\frac{1}{2}$ cm af prøven hele vejen rundt, er der ikke konstateret nogen prøveforstyrrelse.

For dog at konstatere hvor stor en effekt man kan få ved prøveforstyrrelser, er der indstampet en prøve af findelt materiale til samme poretal som de øvrige forsøg. Efter en forbelastning på 120 t/m^2 er genbelastningsgrenen udført (fra $\bar{\sigma}_A = 1.0 \text{ t/m}^2$

enne er sammenlignet med en intaktprøve med samme procedure på ilag no.10. Deformationerne er dobbelt så store som for intakt-røven.

Konklusionen er, at der bør udvises den største omhu ved udvælgelsen af prøven (meget forstyrret prøve giver alligevel ikke relevante oplysninger) og ved tildannelsen af samme.

friktion

Det ligger i selve konsolideringsapparatets konstruktion, at der må forekomme en del friktion. Den forekommer på to forskellige måder:

1. Friktion mellem prøve og ring
2. Friktion mellem stempel og ring

3. Friktion mellem prøve og ring

Friktion mellem prøve og ring kan ikke bestemmes i eet apparat ved blot at variere prøvehøjden, fordi man på denne måde også får beddingeffektens indflydelse målt med.

Kan man derimod sammenligne forsøg med samme prøvehøjde, men forskelligt areal, vil ringens overflade mod prøven være proportional med prøvens diameter, medens beddingeffekten influerer på samme måde i de to forsøg.

Derfor er der udført tre forsøg med prøveareal 158 cm^2 , til sammenligning med forsøgene i det nye apparatur med $A = 38.5 \text{ cm}^2$. Disse forsøg, der er vist på bilag no.11 -13, er korrigeret for apparatdeformationer og bør derfor tages med forbehold. De store apparater har også beddingeffekt, da der er dræn over begge ender. Større beddingeffekt og mindre friktion skal naturligvis give større deformationer.

Friktionen mellem prøve og ring er størst for store spændinger. Samtidig er apparatkorrektionen sikrest.

Genbelastningsgrenene er næsten parallelle for store spændinger og har i det nye konsolideringsapparat en gennemsnitskonsolideringsmodul for Kratbjerg-moræneleret på $22000 \pm 3000 \text{ t/m}^2$ og i de store apparater $22500 \pm 2500 \text{ t/m}^2$ (95 % konfidensgrænser). Der kan altså ikke på det foreliggende grundlag påvises nogen indflydelse fra friktionen.

Man har forsøgt at konstruere et apparat uden friktion ved at give ringen harmonikastruktur, således at den ikke bevæger sig

i forhold til prøven, hvorved der ikke kan udvikles friktion. Ringen består af en meget kraftig gummimembran, der er forstærket med en række smalle metalringe (foto no.1). Apparatet har den yderligere fordel, at ring og stempler heller ikke skal bevæge sig i forhold til hinanden, og at der derfor heller ikke her opstår friktion.

På bilag no.14 ses sammenlignet to genbelastningskurver. Det friktionsfri apparats deformationer er utroværdigt store (ca.30 % større end for normalt apparat). Da primærgrenen også giver meget større deformationer, er det sikkert gummimembranens skyld. Det viste apparat er derfor opgivet som konsolideringsapparat. Derimod viste det sig anvendeligt til permeabilitetsmåling (se f.eks. side 11).

Kun ved triaxiale forsøg kan der udføres friktionsfrie konsolideringsforsøg.

2. Friktion mellem stempel og ring

Denne friktion optræder, når et sandkorn har sat sig fast mellem stempel og ring. De derved opståede friktioner har kun betydning for små spændinger. I grove tilfælde kan de blive større end belastningstilvæksten, og hvis de pludselig udløses, give en udvidelse af prøven (bilag no.13). Begyndelsen af genbelastningsgrenene vil næsten altid være S-formede, bl.a. på grund af friktionen. Her må det gælde, at friktionen altid giver for små deformationer, d.v.s., at de kurver, der har størst deformation, er de mest korrekte. Herved kommer man til det resultat, at genbelastningsgrene altid hælder fra starten, og at S-formen kun sjældent optræder, hvis der ikke er friktion (det sidste dog måske kun for de undersøgte morænelerer). Sammenlign "friktionsfrit forsøg" (bilag no.14).

Beddingeffekt

Det er vist, at friktion mellem prøve og ring er så lille, at den er vanskelig at måle. Ved at udføre forsøg med små prøvehøjder, kan man beregne beddingeffektens indflydelse, hvis man antager friktionen meget lille.

Der er udført tre forsøg med halv så stor prøvehøjde som normalt i det nye apparat. Det ene forsøg (no.12) gav store de-

formationer, medens de to andre (no.13 og 14) gav samme deformationer som de øvrige forsøg. Det må bemærkes, at man for meget stive moræner, f.eks. den bedste Carlsberg moræne må være ekstra omhyggelig med gipsindstøbningen. Det har her været nødvendigt at påføre flere lag for at reducere deformationerne.

Det ses altså, at beddingeffekten er betydningsløs, hvis prøvetildannelse og indsetning er omhyggeligt udført. Disse forsøg er derfor taget med i den almindelige forsøgsbearbejdelse.

Maksimumspændingens indflydelse

Den normale laboratorieteknik består i, at man forsøger at rekonstruere "the stress history". Begrundelsen har været, at man på denne måde får de ved prøveoptagningen beskadigede områder ført tilbage til samme tilstand som den øvrige del af prøven. Det er allerede i forrige afsnit vist, at det kan man ikke. Den anvendte maksimumspænding (σ_{\max}) er her netop i nærheden af forkonsolideringstrykket (σ_{pc}). Derimod ønsker man nu at platte prøven ud, og hertil skal man benytte en spænding, der under normale omstændigheder er lige så stor som forbelastningen. Derfor benyttes den normale forsøgsprocedure uændret.

Ønsker man spændinger, der er så store, at man kan se den retlinede normalkonsolideringsgren, må man bruge andre presser end de normale. Spændingerne må nemlig i så fald kunne komme op på ca. 3000 t/m².

Ved så store spændinger kommer man op i nærheden af brudstyrken for de enkelte korn, og man må regne med, at kornspidserne bliver til stenmel. Hvilken indflydelse, det har på normalkonsolideringsgrenen, er svært at sige; på genbelastningsgrenene kunne det tænkes at give større deformationer. For et par forsøg med $\sigma_{\max} = 2600 - 3200$ t/m² er der foretaget slemning efter forsøget. Disse kornkurver er vist sammen med almindelige kornkurver på bilag no.15 - 16. Det er dog ikke lykkedes at måle nogen knusning.

Bortset fra en eventuel knusningseffekt sker der en blødgøring af prøven. Det må karakteriseres som en omrørings-effekt. (Herom udførligt i bind I).

Specielle problemer ved det nye konsolideringsapparat

Der er to problemer ved det nye konsolideringsapparat, som nærmere skal omtales, nemlig kvældning af prøve ved påsmøring af gips samt udregning af ækvivalent drænvej.

Kvældningen af prøven ved gipspåsmøring var ret uheldig, hvis man ellers kunne bestemme det effektive tryk in situ som det tryk, prøven skal underkastes for at undgå kvældning. Denne måling forudsætter imidlertid, at den maksimale kapillære stighøjde (eller kapillariteten) er større end in situ-spændingen. Morænelers kapillaritet ligger normalt i intervallet 2-10 t/m², og det er derfor oftest den, man bestemmer på den foreskrevne måde. Ulempen ved gipspåsmøringen er derfor ikke så stor.

På grund af apparaturets udformning kan man ikke umiddelbart udregne permeabiliteten, da dræningstilstanden ikke er en parallelstrømning, som antaget teoretisk. Man ønsker derfor at udregne en ækvivalent drænvej, som ved indsættelse i den almindelige formel

$$t = \frac{\gamma_w}{k \cdot K} \frac{H^2}{H_{\text{æqv}}} T$$

giver den samme permeabilitet, som man måler normalt.

I bind I er vist numerisk udregnede tidskurver for det nye konsolideringsapparat med en diameter på 6 cm, en filtersten, der er 2 cm i diameter, og en 3 cm høj prøve.

Tidskurverne er udregnet under to forskellige forudsætninger, nemlig dræning kun til filtersten og samtidig dræning til filtersten og sprækker mellem ring og trykhoveder. På grund af den numeriske metode vil det korrekte resultat ligge mellem disse to værdier. Herved fås

$$H_{\text{æqv}} = 0.7 D$$

Da dræningen ikke er eendimensional, vil tidskurven ikke forløbe med kvadratroden af t for små værdier af t. Man vil ved vandmættet ler få en "initialkonsolideringsgrad" på -0.15. (Herom i kap.VI i bind I).

Forsøgsproceduren

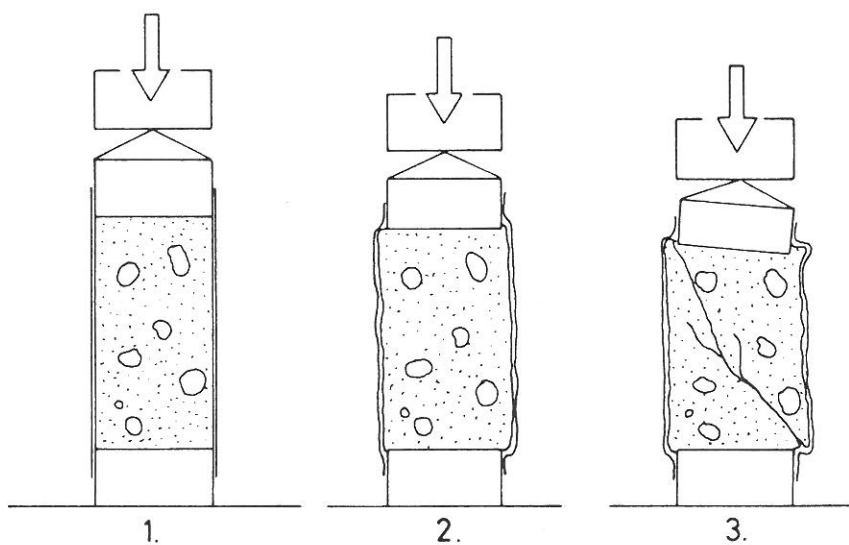
For moræneler belastes først til forbelastningsspændingen σ_{pc} . På primærgrenen overstås udplætningseffekter. Permeabili-

teten kan ikke bestemmes, fordi prøven dræner til hele overfladen (k_{10} vil blive for stor). Aflastes til små spændinger først, vil prøven i nogen grad vende tilbage til tøndeformen. Man vil få megen krybning på genbelastningsgrenene, og de udregnede permeabiliteter vil veksle meget. Der aflastes derfor først til de største aflastningsspændinger (eks.: bilag no. 4). Herved fås meget mindre spredning på permeabilitetsbestemmelsen.

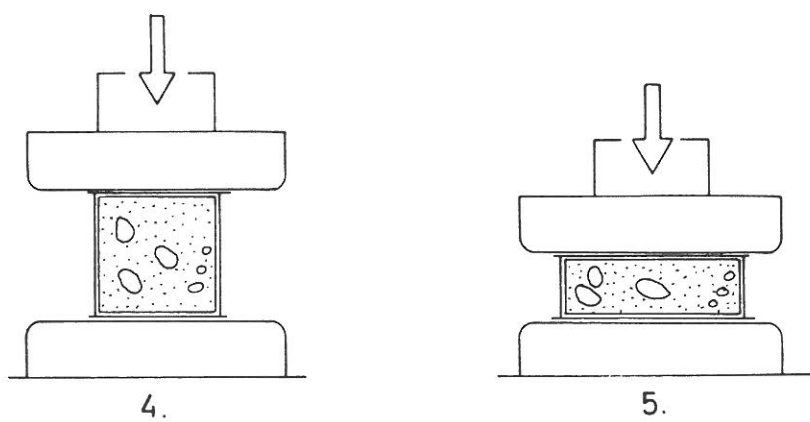
Konsolideringsdeformationerne er ikke nær så afhængige af forsøgsproceduren.

Ved de i dette kapitel omtalte undersøgelser er benyttet mange forskellige prøvestørrelser. Disse er vist på foto no.4 sammen med prøver til triaxialforsøg.

Normalt simpelt trykforsøg



Simpelt trykforsøg med glatte trykhoveder.



4 SIMPLE TRYKFORSØG

Foruden en kortfattet gennemgang af den normale fremgangsmåde og indførelsen af de glatte trykhoveder og mindre prøveløjder benyttes de simple trykforsøg også til kalibrering af virkningen af de glatte trykhoveder, idet det naturligvis ikke er muligt at gøre disse idealglatte.

Dette beskrives naturligt her, men har også stor betydning ved triaxialforsøgene, hvor en nærmere omtale af de glatte trykhoveder findes.

Forsøgene er udført på normale intaktprøver med 10 cm² tværsnitsareal, og deformationsmålingen kan derfor ikke tillægges nogen værdi.

Normalt udførte, simple trykforsøg

Prøven tildannes som en cylinder, der er dobbelt så høj som bred. Prøven sættes fast på nederste trykhoved, øverste trykhoved sættes på prøven, og en membran omslutter prøve og trykhoveder. Da forsøget er udrænnet, er der ingen filtre i trykhovederne. Overfladen ind mod prøven er glat messing. Øverste trykhoved er kegleformet spidset op, hvorved der dannes et charnier (tegning 1).

Under forsøget påføres lasten i trin af et halvt minuts varighed.

Første fejlmulighed ligger i selve tildannelsen af prøven samt i inhomogeniteter bestående af ophobninger af sten. Her ved kan der opstå søjlevirkning i prøven, og altså meget ujævn spændingsfordeling. De resultater, der giver under 50 % af den korrekte værdi, skyldes sikkert denne effekt.

Den næste fejlkilde ligger i selve apparaturet, idet trykhovederne er så glatte, at prøven i begyndelsen bevarer cylinderfaconen og dermed bliver for stor til trykhovederne (tegning 2).

Den sidste og væsentligste fejlkilde ligger i, at jordarten udvider sig under brud. Hvis der dannes et tilløb til en brudlinie, vil denne opsuge vand og blive svagere. Bruddet vil derefter forblive i denne brudlinie, der får et meget større

vandindhold end ved forsøgets begyndelse.

Forsøget udføres ganske vist med konstant volumen, men det betyder kun, at brudlinien suger vand fra de omliggende dele af prøven. Brudlinien er meget tynd, og dræningen til denne foregår derfor hurtigt.

For normalkonsoliderede jordarter afgiver en begyndende brudlinie derimod vand og bliver derved stærkere. Man får dermed et jævnt fordelt brud over hele prøven. Er trykhovederne ru, fås et tøndeformet brud.

Disse bemærkninger gælder i endnu højere grad for brudværdien af $CU_{u=0}$ -forsøg på grund af forsøgets varighed.

Simple trykforsøg med glatte trykhoveder

Man har derfor valgt som en radikal løsning på problemet at udføre forsøgene med glatte trykhoveder og med en prøvehøjde mindre end eller lig med diametren.

De glatte trykhoveder vil påføre prøven den tvang, der er nødvendig, for at få udviklet brudfiguren i hele prøven.

De glatte trykhoveder har en overflade af glas, hvorpå smøres silicone-fedt og herovenpå igen en gummimembran. Det viser sig, at man på den måde opnår en næsten friktionsfri overgang mellem trykhoved og prøve.

På side 28 nederst er vist skematisk et forsøg med glatte trykhoveder. Prøven er trykket sammen til halvdelen af den oprindelige prøvehøjde. Man kan ikke være i tvivl om, at hele prøven er i brud.

Forsøgsserie. Simple trykforsøg.

Der er udført en forsøgsserie med såvel glatte som ru trykhoveder med $A = 10 \text{ cm}^2$. De 19 forsøg fordeler sig på følgende måde:

Forsøg med ru trykhoveder

$H/D = 2.5$	2 forsøg	bilag no.17
$H/D = 2.0$	2 forsøg	bilag no.17

Forsøg med glatte trykhoveder

$H/D = 2.0$	2 forsøg	bilag no.18
$H/D = 1.0$	8 forsøg	bilag no.19
$H/D \approx 0.5$	4 forsøg	bilag no.20
$H/D \approx 0.4$	1 forsøg	bilag no.21

Forsøgsserien er udført på prøver taget inden for et ganske lille område. Materialet er derfor så ens, som moræneler kan blive det. Variationen i forsøgsresultatet skyldes lige så meget variation i tildannelsen af prøven som i prøvematerialet.

Det ses, at forsøgene med $H/D = 2$ og 2.5 har tydelige maxima under udvikling af een brudlinie. For $H/D = 1.0$ har forsøgene G101, G105 og G106 sprækket tværsnit i brud. Disse forsøg har alle maksimumværdier overensstemmende med, at forsøget svarer til en række mindre prøver med større højde-bredde forhold. De øvrige prøver revnede ikke under brud, og der er lodret tangent svarende til, at der ikke er nogen målelig indflydelse fra trykhovederne. For $H/D = 0.5$ og 0.4 ses derimod en voksende indflydelse fra trykhovederne, idet der ikke længere er lodret tangent på arbejdskurven, samtidig er brudværdierne blevet større. På bilagene er angivet H/D svarende til brud.

På bilag no.22 er vist et forsøg, hvor prøven er klempt sammen til den halve højde. Det ses, at indflydelse fra trykhovederne først gør sig gældende efter en deformation på 45 %.

Konklusion

På bilag no.23 er vist forsøgsseriens værdier i forhold til prøvehøjden ($c_v = 20.4 \text{ t/m}^2$). Der er indlagt en kurve, der går gennem gennemsnitsværdierne, og hvis tangent i de enkelte punkter angiver virkningen fra trykhovederne, således som den er fundet ved de enkelte forsøg som en tangenthældning i brud (der er ikke taget hensyn til G101 med usædvanlig revnet tværsnit, se foto no.3).

Tages gennemsnitsværdien af forsøg udført med glatte trykhoveder for $H/D > 0.7$, fås 93 % af vingestyrken.

Trykhovedernes virkning på brudværdien afhænger rimeligvis stærkt af materialet, og man må vel formode, at netop moræneler med så mange store korn, der æder sig ned i membranen, er let påvirkelig.

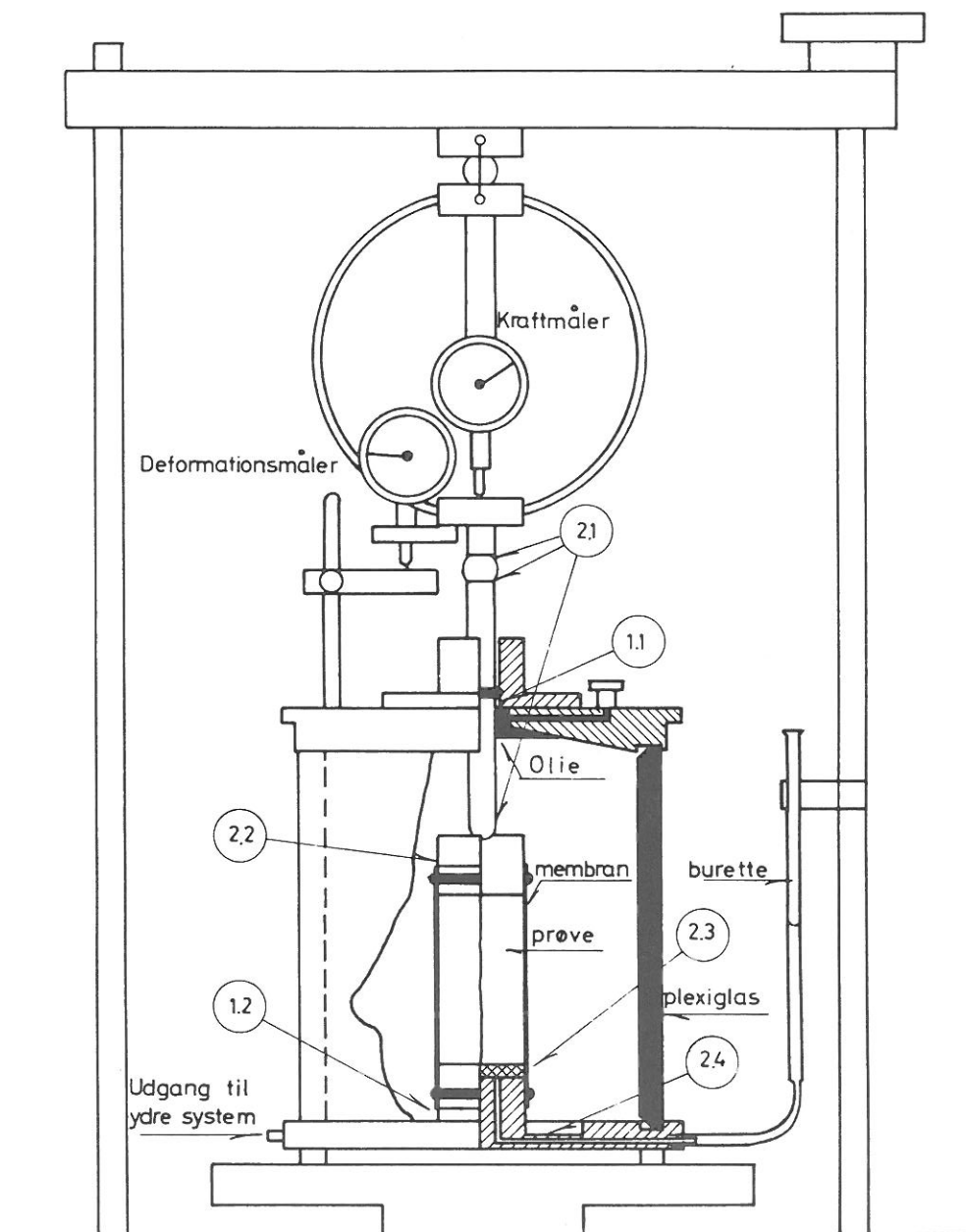
Det må derfor antages, at simple trykforsøg for nogle lerarter endog kan udføres med konsolideringsprøver; man skal blot sikre sig, at der er lodret tangent på arbejdskurverne. Dette indicerer nemlig, at virkningen fra trykhovederne er minimal (sådanne forsøg giver naturligvis værdier svarende til det formindskede poretal).

For sand viser det sig at være nødvendigt at bruge mindst 4 membraner på hvert trykhoved med silicone-fedt mellem alle membraner for at opnå den ønskede virkning. Herved deformeres en sandprøve som en cylinder. Membranerne giver anledning til korrektioner for kornenes indtrængen i disse.

5. TRIAXIALFORSØGET

	side
Triaxialcellens normale opbygning	34
Apparattekniske problemer	36
Teoretiske problemer. Trykhovedets udformning.	39
Den nye triaxialcelle	43
Trykhoveder	43
Drænsystem	44
Membran	44
Deformationsmåling	45
Kraftmåling	48
Det ydre system i anvendt triaxialapparat	50
Triaxialapparatets aflæsningsnøjagtighed	51
Forsøgstekniske problemer	52
Beddingeffekt	
Filtereffekt	
Membraneffekt	
Forsøgsteknik	52
Isotrop konsolidering	52
Drænede forsøg med konstant kammertryk	53
Udrænede forsøg	54
Sammenligning af ældre og nyere forsøg	56

Normalt triaxialapparat



triaxialcellens normale opbygning

På side 34 ses en skematisk tegning af en normal triaxialcelle.

Inde i selve cellen er prøven placeret. Den står på en filtersten, der gennem cellens bund er i forbindelse med en buette til måling af volumenændringer. Oven på prøven placeres et plexiglastrykhoved, og prøven indesluttet i en gummimembran. Om yderligere tætning anvendes et par O-ringe på trykhovedet og på forhøjningen i bundpladen. Cellen består af en overplade og en bundplade samt en plexiglas-cylinder. Tre langsgående bolte spænder cellen sammen. Pakringe sikrer, at cellen er tæt indtil 10 atm. tryk. Cellen er fyldt med vand, der gennem cellens bund står i forbindelse med det ydre system. Et lag olie lyder oven på vandet for at sikre, at overpladen er tæt. Gennem overpladen fører et stempel med afrundet ende ned til øvre trykhoved, der er forsynet med en tilsvarende afrunding. I overpladen findes en udluftningsventil, der også kan anvendes ved påfyldning og aftapning af olie.

Det omtalte system kan benyttes til isotrop konsolidering forsøgets første fase.

I forsøgets anden fase flyttes cellen hen i en presse, der bevæger cellen op mod en kraftmåler, der er fastgjort til pressens øvre del gennem et kugleled.

Kraftmåleren er en såkaldt kraftring. Metoden består i, at man måler deformationen af en diameter med et måleuret. Kraftingen kan kalibreres en gang imellem og viser sig at være temmelig stabil. Man måler prøvens lodrette deformation ved et måleuret, der er placeret på kraftmåleren, og som træder på en etalplade, der er i forbindelse med cellens overplade. Det ses, at man ad sælsomme veje "direkte" får et udtryk for prøvens deformation. Ved deformationsmåleuret derimod placeret på pressens ene stolpe og trådte på overpladen, fik man kraftmålerens deformation med i målingen.

Der kan med dette udstyr udføres forsøg med kontrolleret tempelhastighed, og idet bordets opadgående bevægelse styres af en kompliceret gearkasse med et utal af udvekslingsmuligheder, kan der udføres såvel drænede som udrænede forsøg.

Apparattekniske problemer

De apparattekniske problemer kan deles op i

1. Måling af den lodrette kraft
2. Måling af den lodrette deformation
3. Dræning af prøven
4. Membranen
5. Måling af volumenændringen

1. Måling af den lodrette kraft.

Den lodrette kraft måles uden for cellen, og man måler derfor stempelfriktion med (1.1). Denne stempelfriktion varierer temmelig meget under et forsøg, men ved at anvende roterende bøsning kan man opnå, at stempelfriktionen bliver jævnt varierende. Man kan derimod ikke få elimineret denne fejl ved at anvende roterende bøsning. Påvirkes stemplet yderligere af en vandret kraft fra prøven under brud, forøges stempelfriktionen. Da den vandrette kraft ikke måles, kan man ikke korrigere for denne fejl.

Denne vandrette kraft opstår, fordi prøven er i fast forbindelse med bundpladen (1.2), og fordi mange prøver bryder langs en brudlinie, der danner en vinkel på $\sim 45^\circ - \frac{\Phi}{2}$ med lodret. Er bruddet tøndeformet, kan denne kraft blive lille. Skal problemet løses, må prøvens nedre trykhoved stå på en kugle, således at prøven er pendulophængt under forsøget, eller det øvre trykhoved må være glat, så ingen vandret kraft kan overføres fra prøve til øvre trykhoved.

2. Måling af den lodrette deformation.

Den lodrette deformation måles gennem et utal af apparatdele, der hver for sig giver en deformation, der kan tydes som en sammentrykning af prøven, nemlig

- 2.1 Diverse kugler mod kugleskåle. Er apparatet eller prøven ikke godt centreret, fås kraftoverføring, før disse dele er i fuldkommen kontakt; er en af fladerne snavset, må sandkorn og lignende knuses under kraftpåføringen.
Kan ikke kalibreres.

- 2.2 Øvre trykhoved. Flexiglas deformeres meget.
- 2.3 Filtersten. Foruden beddingeffekt, som alligevel ikke kan undgås, da afretningsmetoderne ikke er så præcise som måleurene, findes også indpresning af filtersten i messing.
- 2.4 Bundpladens deformationer ved voksende kammertryk er måske den betydeligste faktor.
Bundpladen er alt for tynd.
Denne fejl kan kalibreres.
- 2.5 Boltene, der holder cellen sammen. Disse bolte skal tage ca. 500 kg hver for 10 atm. overtryk i celle.
Væsentlige deformationer i gevind.
Denne fejl kan kalibreres, hvis man altid har samme bolte i samme huller.

Endelig kan nævnes, at hvis kraftringen ikke er helt korrekt justeret, vil den anlægsplade, hvorpå måleuret er placeret, vippe under kraftpåføringen, og deformationsmålingen vil få endnu en fejl, hvis virkning ikke kan forudsiges.

Før en måling med dette apparat må man derfor udføre en kalibrering af apparatet ved i prøvens sted at placere et temmelig ueftergiveligt materiale f.eks. messing, og herefter udføre et antal forsøg for om muligt at kunne adskille virkningen fra kammertrykket og virkningen fra stempelpinden. Apparatet bør skilles og samles nogle gange, for at man kan se, med hvilken præcision kalibreringen kan udføres. Endvidere må den viste model kalibreres med og uden filtersten.

Viser det sig, at apparatkorrektionen bliver på mere end 30-40 % af den samlede deformation, kan man vanskeligt tillægge denne måling særlig værdi.

For moræneler kan man for små forskydningsspændinger få en korrektion på over 50 % (apparatets egendeformation er større end prøvens!).

Den lodrette deformationsmåling fungerer meget dårligt, hvis stempelkraften er nul, altså ved isotrop konsolidering, fordi man må bevæge stempelstangen indtil udslag på kraftmåler.

3. Dræning af prøven.

Den normale prøvehøjde er 2 x diametren, og er drænet kun eensidigt, kan dræningstiden blive meget lang. Man lægger da filterpapir op langs med prøven (det såkaldte omfangsdræn). Herved indføres imidlertid en fejl, der kan kaldes filtereffekten og som består i, at man måler sammentrykningen af filterne med i volumenmålingen. Man kan således måle ved isotrop konsolidering, at den totale volumenændring er 5-10 gange den lodrette deformation.

I volumenmålingen indgår også udpresning af vand mellem prøve og membran. Denne virkning kan ikke skelnes fra filtereffekten, og begge disse effekter kaldes derfor i det følgende for filtereffekten.

Endvidere er der et problem med vandmætning af filterstenen. En del luft i filterstenen betyder, at man ikke altid måler samme tryk på "ydtersiden" af filterstenen som det, der er i prøven. Problemet er størst ved forsøg, hvor poretrykket måles eller ved $CU_{u=0}$ -forsøgene.

Man har søgt at løse problemet ved to indgange til nederste filtersten, således at den kan "gennemskylles", men det er næppe effektivt. Ved at have en filtersten også oven på prøven, kunne den resterende luftmængde måske skylles gennem prøven under tryk (back-pressure). Metoden er anvendelig for sand, men allerede højst tvivlsom for moræneler.

4. Membranen.

Membranen er en tynd gummimembran, der er meget følsom over for spidse sandkorn. Den kan med held forstærkes med latex, der da smøres på f.eks. 5 gange. Problemet er størst for sand og moræneler.

Membranen tillader luft under tryk at passere, men holder vandet ude. Ved høje kammertryk presses luften i cellens vand ind gennem membranen, og man måler en forøget vandudpresning.

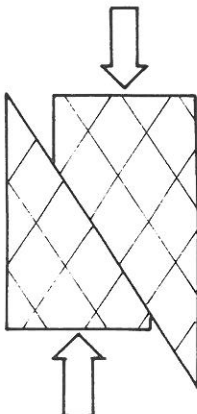
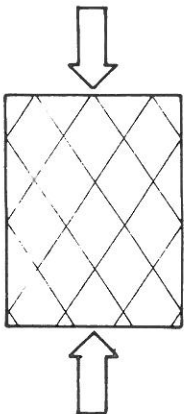
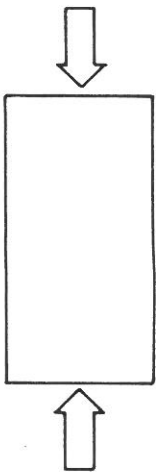
Det klares ved at anvende vand, der har været udsat for stort undertryk eller er udkogt.

For meget små spændinger kan det være nødvendigt at korrigere kammertrykket for membranspændinger. Det gøres dog ikke i de forsøg, der er medtaget i denne afhandling, da korrektionen er vanskelig. (Membranspændingerne er mindre end 0.05 t/m^2).

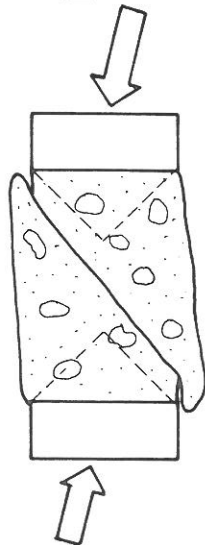
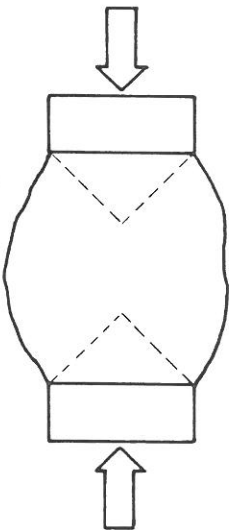
Teoretisk brud

Stabilt brud

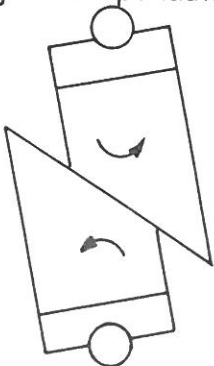
Instabilt brud



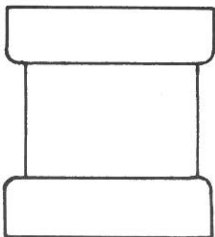
I triaxialapparat
med ru trykhoveder
modificeres de to
brudformer



Forsøg med pendulophængning



Forsøg med glatte trykhoveder



5. Volumenmålingen.

Hvis de udpressede vandmængder bliver tilpas små, må volumenmålingen udføres på en anden måde end den viste, idet fordampning fra buretten må undgås. Volumenmålingen viser sig at være temmelig temperaturfølsom på grund af luft i prøve og drænsystem.

Teoretiske problemer

Man udfører normalt forsøg med prøver, hvis højde er det dobbelte af diameteren.

Det forudsættes ved beregningen af styrkeparametrene, at hele prøven kommer i brudtilstand. Denne brudtilstand fremkaldes af en lodret virkende stempelkraft.

Et brud i en prøve kan enten være stabilt eller instabilt.

Det stabile brud optræder i jordarter, der afgiver vand under brud, altså i de normalt konsoliderede tilfælde eller i tilfælde, hvor spændingerne kun er lidt mindre end forbelastningsspændingerne. Under voksende forskydningsspændinger vil en af brudlinierne udvikles i forhold til de andre, og den vil afgive vand til det omkringliggende materiale, der derved vil blive svagere, og bruddet vil søge ud i disse områder. Det ses, at man får brud i hele prøven.

Det instabile brud optræder i jordarter, der optager vand under brud, altså forbelastede jordarter eller sand, og altså også moræneler. Under voksende forskydningsspændinger vil det først dannede tilløb til en brudlinie optage vand, og området vil blive så meget svagere, at bruddet kun vil finde sted her.

For drænede forsøg (CD-forsøg) vil bruddet begynde nær et af trykhovederne og vil efterhånden brede sig ind i prøven. Et sådant progressivt brud er vel det, der finder sted i naturen, men er ikke i overensstemmelse med de teoretiske brudfigurer. Ved maksimum af registreret stempelkraft vil dele af prøven forlængst have passeret maksimumværdien og den således målte værdi vil derfor være mindre end svarende til ensformige spændings- og deformationsforhold. Volumenændringen er ikke repræsentativ for prøven.

For udrænede forsøg, hvor volumenet holdes konstant ($CU_{u=0}$), vil vandindholdet i brudlinien stige, samtidig med at de omkringliggende arealer tørlægges. Man har ingen kontrol

over det poretal, der svarer til styrkeparametrene. Ved slutningen af forsøget begynder højdeændringen at influere så meget, at en arealkorrektion må udføres. Man korrigerer ud fra den antagelse, at prøven deformeres som en cylinder, således at arealet bliver større. Man burde derimod snarere formindske arealet. Den første fremgangsmåde benyttes og giver en falsk maksimumspænding.

I triaxialapparatet, hvor prøven er placeret mellem to ru trykhoveder, ser bruddet lidt anderledes ud, idet prøvens ender armeres af trykhovederne, og der derfor opstår "stive" ledgemyer ved trykhovederne. Vist punkteret på figurerne, side 39.

Det stabile brud vil muligvis blive tønndeformet, og kraftens vandrette komponent er lille.

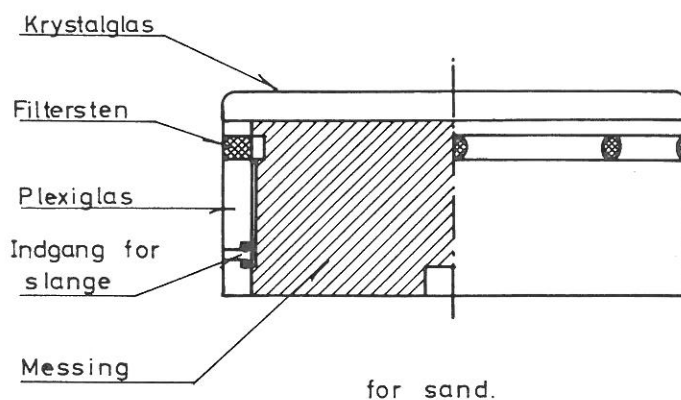
Det instabile brud får hurtigt en skrå kraftresultant, der også giver momenter i prøven. Brudmåden ligner nærmest et skråtstillet skærboksforsøg. Man kan ikke måle kraftpåvirkningen, da den vandrette kraft ikke kan måles og giver bidrag til stempelfriktionen, så heller ikke den lodrette komponent kendes med nogen sikkerhed. (Foto no.6).

Man kan komme uden om det måletekniske problem ved at op hænge prøven mellem to kugler, der da vil styre kraftretningen, så den altid er lodret. Herved vil brudlinien svinge i forhold til kraftretningen. Det må dog antages, at en korrektion vil være forholdsvis beskedent.

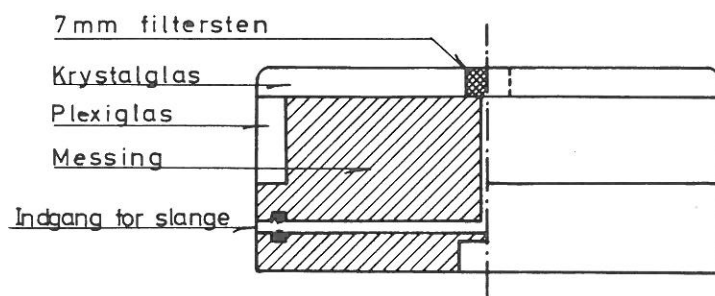
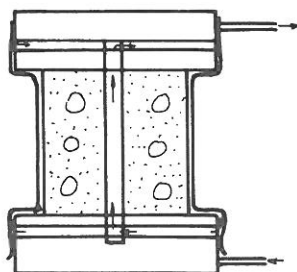
Den helt konsekvente løsning er at anvende glatte trykhoveder, hvorved man opnår, at den plastiske zone kan udvikles i hele prøven. Ved at gøre prøvehøjden tilpas lille, kan man endvidere opnå, at trykhovederne påfører prøven den tvang, der er nødvendig, for at det instabile brud kan blive stabilt. Herved fås et ensformigt fordelt vandindhold i hele prøven, således at volumenmålingen bliver et mål for prøvens ændringer i vandindhold. Endvidere deformeres prøven som en cylinder, hvad der forudsættes under udregningen af sideudvidelsen. Med den mindre prøvehøjde fås også en mindre dræntid. (Foto no.6).

Glat trykhoved

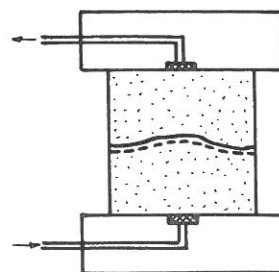
for ler og moræneler



for sand.

Gennemskylning af filtre
for ler. Omfangsdræn

for sand. Gennemskylning.



Hele systemet kan vandmættes,
men der må anvendes varierende
undertryk

Den nye danske triaxialcelle

På grundlag af analysen af det eksisterende apparatur, blev det hurtigt helt klart, at skulle man måle morænelers deformations- og styrkeegenskaber, måtte man simpelthen konstruere et nyt triaxialapparat, der kunne arbejde med den fornødne akkurateesse.

Apparatudviklingen har taget ca. 2 år. Det begyndte med forandringer på et ældre, dansk triaxialapparat, hvor kraftmålingen fandt sted inde i cellen, der var fyldt med luft og temmelig sprængfarlig. Med en del indvundne erfaringer blev den nye, danske triaxialcelle derefter konstrueret; denne blev dog atter forandret så meget, at en type 2 blev konstrueret. Det er denne type 2, der vil blive omtalt nøjere i det følgende, idet det er mit indtryk, at der nu er nået et virkeligt tilfredsstillende resultat.

Trykhovederne.

Af teoretiske grunde er det klart, at trykhovederne må være glatte. Det vil sige, at filterstenen må fjernes, og dræningen må ordnes på anden måde.

I en artikel i "Geotechnique" omtaler Rowe og Barden et grundlæggende arbejde med glatte trykhoveder, og det angives, at friktionen kan blive mindre end 1^0 . Som overflade benyttes glas, hvorpå der er smurt siliconfedt, hvorover der er en tynd gummimembran. Denne gummimembran kan glide på fedtet og glasset, og samtidig tillader den ret store differensdeformationer. Man må gå ud fra, at friktionen afhænger af prøvematerialet, og at den kan blive noget større for moræneler på grund af de mange skarpe korn. Der er gennemført en forsøgsserie med simple trykforsøg og små prøver for at finde indflydelsen fra friktionen ved trykhovederne (bilag no.23). For prøvehøjden lig med diametren kunne ikke spores nogen virkning, og man anvender derfor denne dimension, idet man også her får den nødvendige tvang for at skabe et stabilt brud.

Trykhovedet er iøvrigt udformet med specielt henblik på at få små deformationer. På side no.42 ses, at trykhovedet består af en kerne af messing, hvorpå er klistret en glasplade. Messingkernen er omgivet af en plexiglasring, da messing ødelægger gummi og derved kan være årsag til, at membranen skør-

ner under langvarige forsøg. I overgangen mellem messing og plexiglas findes drænsystemet, der kommer frem otte steder på siden af trykhovedet.

På foto no.3 ses et trykhoved, der er forsynet med gummi-membran og siliconfedt. Slangen pakkes med en O-ring.

Øvre og nedre trykhoved er ens og har en diameter på 8 cm således at prøven kan udvide sig uden at komme ud over trykhovedets kant.

For sand er omfangsdrænet unødigt besværligt. Der kan ikke drænes hurtigt nok, og vandmætningsproblemer klares ved direkte gennemskylning. Der er derfor udført trykhoveder, beregnet specielt for sand. Se tegning. Filterstenen fedtes hurtigt til og må renses hver gang.

Drænsystemet.

Det er vigtigt, at drænsystemet er sådan udført, at man kan fjerne al luft fra dette. Moræneler er så lidt permeabel, at man ikke får meget ud af at anvende de almindelige metoder, bortset fra at det ikke kan være ønskeligt at udskifte porevandet med destilleret vand.

Der er derfor fremstillet specielle dræn, der består af smalle sanddræn med filterpapir mod prøven og lærred mod membranen. Der er eksperimenteret meget for at gøre dem så små, at filtereffekten blev tilpas lille, samtidig med at "permeabiliteten" blev så stor, at prøvens konsolidering ikke blev forsinket.

Drænene når fra det ene trykhoved til det andet, og det er derfor muligt at gennemskylle drænene, uden at prøven iøvrigt berøres. Herved sikres en effektiv gennemluftning, og dermed en korrekt måling af poretrykket eller et korrekt udført $CU_{u=0}$ -forsøg. Man får intim kontakt mellem porevand og filtervand (side no.42).

En morænelersprøve kan holde til meget i forhold til så mange andre jordarter, og det simplificerer prøveindsætningen meget.

Membranen.

En membran skal altid slutte så tæt som muligt til prøve

og trykhoveder for at undgå lommer af vand, der trykkes ud i volumenmåleren under voksende kammertryk.

For glatte trykhoveder kompliceres sagen af, at membranen skal ud over trykhovederne, der er noget større end prøven. Membranen må være forsynet med "knæk" flere steder for at undgå vand i hjørnerne.

Er prøven meget stenet, kompliceres sagen yderligere.

Den bedste løsning er at støbe membranen direkte på prøve, trykhoveder og filter. Herved fås en hel effektiv tilslutning mellem membran og prøve. Det er derfor ikke længere nødvendigt at fjerne store sten fra overfladen og dermed svække prøven.

På foto no.5 er vist en meget stenet prøve med påstøbt membran.

Råmaterialet er Latex på ammoniakbasis, 60 %-opløsning og selvvulkaniserende, og er præcis det samme, som de normale membraner fremstilles af. Man kan dog ikke anvende dyppemetoden, men må smøre Latex'en på med pensel (5-10 oversmøringer).

Deformationsmålingen.

Det gælder naturligvis om at måle så direkte som muligt fra nedre til øvre trykhoved. Derfor må deformationsmålingen foregå inden i cellen. Måleurene kan ikke tåle vand, men arbejder udmærket i olie, forudsat de ikke imellem forsøgene tørres ud. Mellem forsøgene må de derfor opbevares i olie. Til gengæld er det ikke rart at have olie omkring prøven, fordi denne ødelægges, hvis membranen er utæt. Cellens nederste halvdel fyldes derfor med vand, den øverste del med olie.

På bilag 24 og foto no.7 ses bunden af cellen. Bunden er skålformet for at hindre spild ved tømning og fyldning af cellen samt sammenblanding af olie og vand, idet man ikke kan hindre, at en tynd oliefilm følger med vandet ned. Der er seks indgange til cellen, hvoraf de to underste benyttes til vand og olie. Gennem vandtilledningen sættes tryk på cellen. Det rør, der ses stikke op fra bunden, benyttes til at føre olie til cellen, efter at vandet er fyldt på. Af de øvrige fire indgange benyttes kun de to, idet slangerne til øvre og nedre trykhoved ad denne vej føres ubrudt ud gennem cellebunden for at mindske risikoen for utætheder. Der tætnes om slangerne ved at spænde omløberne.

Den plade, hvorpå prøven står, er i forbindelse med cellens bund gennem en kugle; pladen kan vippes ved hjælp af de tre justerskruer, der ses på bundens side. Denne mekanisme kan løsnes, således at prøven er pendulophængt under brud. (Dette kan kun bruges ved ru trykhoveder).

På denne plade er deformationsmålingsarrangementet fastgjort, og herfra måles direkte til øvre trykhoved.

De skilleflader, der er mellem justerpladen og nedre trykhoved, udstobes med gips for at hindre deformationer her.

Apparatet er beregnet til at kunne tage op til 14 cm høje prøver, og det er derfor nødvendigt at indskyde et mellemstykke af messing, der er placeret under prøven for ikke at belastte prøven unødigt.

Ved kalibreringen af systemet indskydes et messingstykke af form som prøven og betrækkes med en membran, et "blindforsøg" udføres herefter. På bilag no.25 ses sådanne kurver for det normale triaxialapparat som omtalt side no.35 og de tilsvarende kurver for den nye danske celle, både første og anden type. Det må bemærkes, at arealet af prøverne i det normale er 10 cm², i det danske 38.5 cm², så de virkelige kræfter er fire gange så store i den danske celle. Halvdelen af den viste deformation skyldes deformation i gummilagene på de glatte trykhoveder. Apparatets "egenelasticitetsmodul" er større end 500000 t/m², og det er derfor ikke nødvendigt at korrigere for apparatdeformationen!

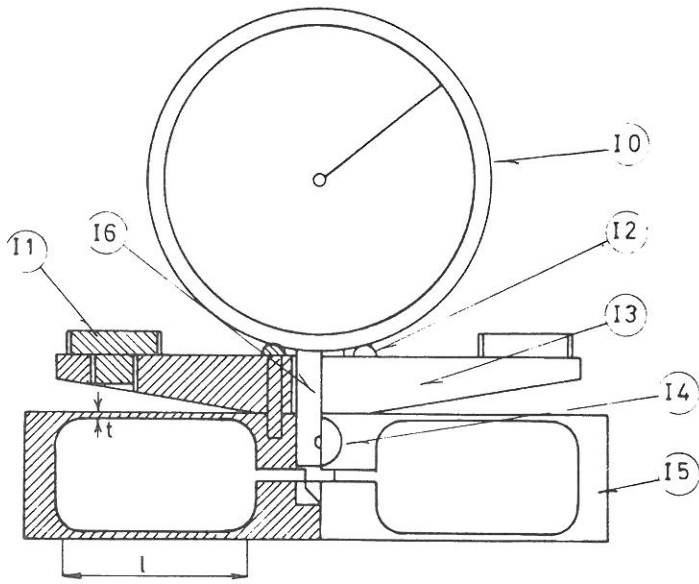
Den viste kalibrering egner sig kun for prøver med glatte overflader, altså først og fremmest ler. Moræneler må dog også regnes til denne kategori, dog må det understreges, at ujævnheder ved afretningen først forsvinder under primærgrenen. For sand er indpresning af korn i membran en så væsentlig faktor, at den viste kurve ikke umiddelbart kan anvendes.

Ved meget store deformationer kan måleurene inden i cellen løbe ud, og man må derfor måle deformationerne uden for cellen. Prøven kan dog deformeres 5 %, hvis der anvendes 1/1000-måleure, 14 % med 1/100-måleure, inden det sker, og er da i en tilstand, hvor deformationerne er så store, at apparatets forringede målenøjagtighed ikke spiller så stor rolle.

På foto no.8 ses cellens underdel med måleure og prøve monteret.

Det ses, at man måler præcist også ved isotrop konsolidering (sml. normalt apparatur).

Målebro
Samlingstegning
1:1



I 0	Måleur	
I 1	Gevindstykke	Messing
I 2	2mm skruer L = 15	Messing
I 3	Bjælke	CRO 861
I 4	Fingerskrue	Messing
I 5	Målebro	CRO 861
I 6	Passtifter 2°-8	Stål

Måling af den lodrette kraft.

Kraftmåling finder sted i cellens øvre halvdel. Denne ide er overtaget fra det gamle danske triaxialapparat.

I cellens topplade er drevet placeret samt en udluftningsventil. På stemplet er kraftmåleren placeret. Foto no.9.

Der er til denne celle udviklet en ny type målere, idet der måtte stilles krav om ringe størrelse, rationel fremstillingsmåde og en hel fast kalibrering.

På foto no.10 ses en serie af disse målere. Som princip er anvendt 4 indspændte bjælker, og hele rammen er fræset ud af et stykke. På midten er et par fortykkelser. Måleuret er fastgjort i den øverste, og den nederste danner anslag mod prøven. På den øverste er en bjælke fastgjort til videreførelse af kraften. Spalten mellem fortykkelserne bør lukke før brud i måler.

Selve måleinstrumentet er i eet stykke og så robust, at da ved et uheld 200 kg lodder væltede nedover den ene under kalibreringen, skete der ingen ændring heri!

Man behøver kun to grundstørrelser. Den eneste forskel på 50 kg-rammen og 200 kg-rammen er, at 50 kg-rammen er plan-slebet lidt mere (variation i fligtykkelsen).

Man kan derved fremstille en serie forskellige kraftrammer til samme pris som en serie ens.

Kraftrammerne er lavet af temmelig godt stål. I 50 kg-rammen er maksimumspændingerne 10500 kg/cm^2 .

Kalibreringskurver er vist på bilag no.26 - 28.

Formlerne for kraftrammerne kan let udledes, hvis man forudsætter fligene tynde i forhold til forbindelsen imellem dem.

Man får

$$\sigma_{\max} = \frac{3P \cdot l}{2bt^2} \quad \text{og} \quad \delta = \frac{l^3}{Ebt^3} P$$

På side no.47 er vist en tegning af 50 kg-kraftrammen.

Med $l = 2.83 \text{ cm}$; $b = 2.0 \text{ cm}$, $t = 0.1 \text{ cm}$ og $E = 2.1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$ fås for $P = 50 \text{ kg}$

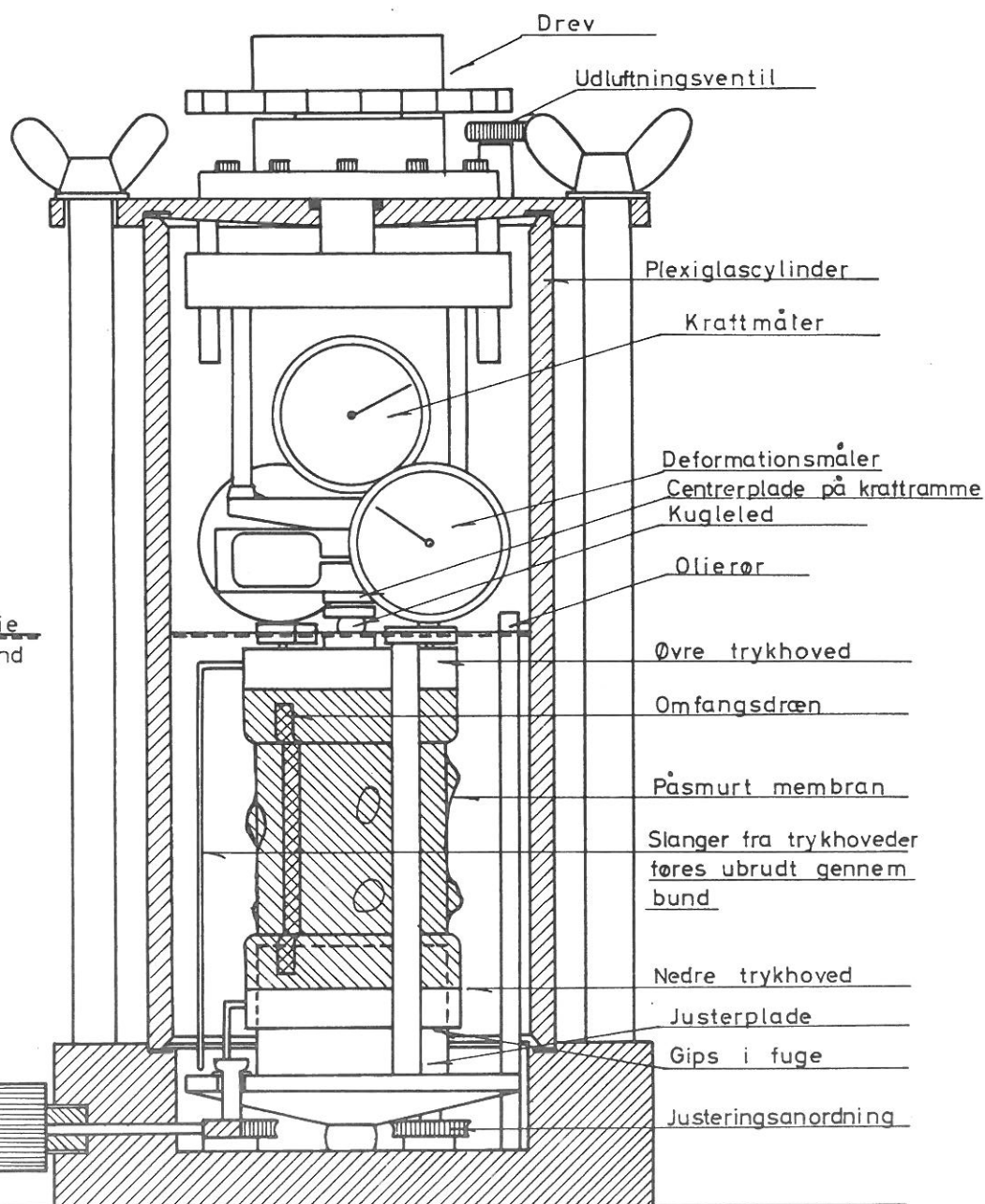
$$\sigma_{\max} = 10500 \text{ kg/cm}^2 \quad \delta_{\max} = 2.7 \text{ mm}$$

og kalibreringen $\delta = 0.0540 P \text{ mm}$ eller $P = 18.5 \delta \text{ kg}$.

Mellem øvre trykhoved og kraftramme er indskudt et kugleled, der er vist på foto no.11. Det har været det led, der har voldt de fleste kvaler, fordi der ikke må kunne finde vandrette

Dansk triaxialapparat med morænelersprøve

Top og bund vist delvis gennemskåret



påvirkninger af øvre trykhoved sted under justeringen.

Umiddelbart før forskydningsspændinger skal påføres, justeres prøven ved at vippe med justerpladen i bunden ved hjælp af justerskruerne. Centreringen kan udføres præcist, idet kraftmåleren er forsynet med centrerskive.

En tegning af hele cellen er vist på forrige side.

Det ydre system i triaxialapparatet

Det ydre system skal kun omtales ganske kort, idet der ikke her foreligger principielt nye ting.

Kammertrykket.

Kammertrykket måles med et almindeligt manometer fra $\sigma_3 = 20-100 \text{ t/m}^2$, med et kviksølvmanometer fra $\sigma_3 = 0.8-20 \text{ t/m}^2$ og for mindre tryk med et vandmanometer. Kammertrykket kan dirigeres med en skruekontrol. For tidskurver, der kræver lang konstant kraftpåvirkning, anvendes en kviksølvtrykholder af samme type som angivet af Bishop & Henkel (1957). Systemet består af to beholdere forbundet med en plastikslange. Den ene beholder kan bevæges op og ned. I beholderne er kviksølv, og differencen mellem de to overflader giver trykket. Den bevægelige beholder er ophængt i en fjeder, der har en sådan stivhed, at højdeforskellen mellem de to kviksølvoverflader bevarer, selvom der løber kviksølv fra den ene beholder til den anden. Man kan opnå større tryk ved at forbinde disse trykholdere i serie. Imidlertid bliver systemet let utæt ved større tryk, og det anvendes derfor kun til 40 t/m^2 . For større tryk må man anvende skruekontrollen. Systemet fungerer iøvrigt perfekt.

Volumenmålingen.

Volumenmålingen foretages på et vandret liggende, kalibreret glastrør med en luftboble i. Volumenmåleren er placeret så tæt på prøven som muligt. Glasrøret er forbundet med en burette i den anden ende for grovere målinger af volumenændringer. Ved denne metode opnås, at fordampning fra buretten ikke spiller nogen rolle. Buretten kan hæves og sænkes, så vandoverfladen er i niveau med prøvemidte (foto no.11).

Olie- og vandreservoir.

Til fyldning af cellen med olie og vand er konstrueret et flaskesystem, der automatisk udbobler vandet, inden det lukkes ind i kammeret, idet vacuum'et ledes ind over vandoverfladen til det øvrige system. Systemet består af tre flasker, hvoraf de to store indeholder olie og vand, medens den lille bruges som vindkedel, hvis man skal have vacuum i prøven og samtidig fylde kammeret med vand og olie.

Hanesystemet.

Hanerne er samlet på en tavle, hvor også en systemskitse af hele systemet er anbragt.

Fotografier af det ydre system er vist på foto no.12.

Triaxialapparatets aflæsningsnøjagtighed

For moræneler er deformationerne temmelig små og de lodrette deformationer kommer meget hurtigt på grund af luft i prøven, og fordi de initiale deformationer tit er store i forhold til de totale. Det er derfor ønskeligt at kunne måle differenser med stor præcision for at kunne skelne på tidskurver, om de primære deformationer er overstået. Derimod spiller det ikke nogen rolle, om hele målerens nøjagtighed er meget mindre, end mindste differens antyder; dette afgøres naturligvis af den præcision, hvormed selve forsøget kan udføres.

Der anvendes $\frac{1}{1000}$ måleure, hvormed der kan skønnes $\frac{1}{10000}$ mm eller ca. 0.0002 % af prøvehøjden. For målinger af størrelsen millimeter må man dog regne med fejlmuligheder på op til et par procent.

Volumenmålerrøret måler med 0.01 cm³-enheder, og der kan altså aflæses 0.001 cm³ eller 0.0003 % af volumenet. Ved volumenkonstante forsøg anvendes et kapillarrør, der er endnu langt mere præcist (foto no.11). For volumenmålingen gælder, at temperaturændringer giver en usikkerhed, der er meget stor i forhold til disse mindsteværdier. Man opnår dog meget ved at udføre forsøgene i "temperaturkonstante" omgivelser.

Forsøgstekniske problemer

De forsøgstekniske problemer består af tre elementer

1. Beddingeffekt
2. Filtereffekt
3. Membraneffekt

Beddingeffekten skyldes, at prøven ved afretning ikke bliver helt plan, samt at de yderste ender bliver noget forstyrret under afretningen. Derved bliver de målte deformationer meget større for førstegangsbelastningen end for genbelastningsgrene. Midlet er at udsætte prøven for et temmelig stort kammertryk, inden man begynder på det enkelte forsøg. Man må dog herved tage så meget hensyn til "the stress history", at man ikke udsætter prøven for større forbelastninger, end den har haft før.

Filtereffekten skyldes dels, at filtrene afgiver vand for voksende kammertryk, dels at membranen ikke slutter helt tæt til prøven for små kammertryk. Filtereffekten har også størst betydning på primærgrenen, men virker derudover også med et elastisk bidrag på alle senere belastningstrin. Filtereffekten er den alvorligste hindring for udførelsen af perfekte forsøg.

Membraneffekten opstår, fordi en gummiinde tillader luft under tryk at passere, medens den er tæt over for vand. Er der luft i vandet i cellen, vil det derfor ved høje tryk presses ind gennem membranen, og man vil måle en forøget vandudpresning. Man anvender derfor udboblet vand i kammeret.

De nævnte effekter er så store, at selv de bedste målinger af deformationerne må formodes at være behæftet med en spredning på mellem 3 og 5 %. Det er derfor kun ved en gennemregning af disse forsøg nødvendigt at tilstræbe en regnenøjagtighed på et par procent, eller hvad man kan opnå på en regnestok.

Forsøgsteknik

I det følgende vil kort blive beskrevet den anvendte forsøgsteknik, der er noget afhængig af, hvilken forsøgstype man agter at udføre.

Isotrop konsolidering.

Ethvert triaxialforsøgs første fase er en isotrop konsolidering.

Der udføres først en primærgren til forbelastningsspændinger, eller, hvis denne er større, end apparatet kan klare, til et maksimale kammertryk (100 t/m^2). Herved er sikret, at trykloveder og prøve passer sammen. Der regnes med, at beddingeffekten er overstået på primærgrenen. I realiteten sætter dette maksimaltryk en øvre grænse for stivheden af den ler, der kan måles på, og apparatet kan derfor kun med vanskelighed klare målinger på de hårdeste morænelærer. For disse er det nødvendigt at afrette endefladerne ekstra godt. Det gøres ved at "slibe" lisse på en fugtig glasplade. Gøres dette ikke, vil målingen af deformationerne være råling af "toppenes" deformationer i endefladerne.

Skal man benytte vandudpresningen til noget senere i forsoget og varieres herunder på kammertrykket, burde filtereffektens indflydelse kendes. Den er dog meget vanskelig at bestemme; bedst gøres det, hvis prøven bringes i en tilstand, hvor ϵ_v/ϵ_i burde være 3. Dette er dog kun tilfældet ved gentagne isotrope genbelastninger, hvis prøven ikke har været underkastet andre påvirkninger end tildannelse. På primærgrenen er $\epsilon_v/\epsilon_i > 3$, nogle gange op mod 10, uden at årsagen nødvendigvis er apparatteknisk (se herom i bind I).

Man udfører altså en isotrop genbelastningsgren og er ϵ_v/ϵ_i større end f.eks. 3.5 - 4, må man skifte membranen og håbe på bedre held næste gang.

På primærgrenene får man altid hurtigere konsolidering end på sekundærgrenene, fordi det er de ydre dele af prøven samt ting helt uden for prøven, der væsentlig giver bidrag til målingerne.

Efter at primærgrenen er udført, korrigeres for ændringer i højde og areal. Det gøres bedst ved at regne arealændringen i % dobbelt så stor som højdeændringen.

For forsøg med mindre sløjfer er fejlen ved at regne med begyndelseshøjde og volumen meget lille (under 1 %), men udføres forsøg med større variationer (f.eks. $CU_{u=0}$ -sløjfer), korrigeres altid for ændringer i højde og areal.

Drænede forsøg med konstant kammertryk.

Forsøg med konstant kammertryk er de eneste forsøg, hvor ler kan ses bort fra filtereffekten. Man kan derfor med stor sikkerhed bestemme Poissons forhold ν .

Der er dog en stor vanskelighed også her. Det er jo nemlig således, at de vandmængder, der under et sådant forsøg presses ud, er meget små i forhold til de udpressede vandmængder ved isotrop konsolidering. Man må derfor sikre sig, at det sidste isotrope trin ikke alene er "færdigkonsolideret", men også at volumenændringerne er blevet meget små, inden for det tidsrum et par belastningstrin tager.

Når en prøve underkastes forskydningsspændinger, forårsager disse forskydningsdeformationer, og for forbelastede lerarter dilatation. Hvis en prøve befinder sig i en tilstand, der kan kaldes volumenkonstant, og man her optegner en tidskurve, vil det vise sig, at prøven først afgiver vand; herunder finder forskydningsdeformationerne sted og fremkalder dilatationen. Prøven begynder at suge vandet til sig igen. Processen forløber temmelig hurtigt (dette illustreres senere).

Er en prøve kommet meget nærmere brud, styres deformationshastigheden af poreundertrykket. I starten vil dette stige, og prøven opsuger vand, hvorved dilatationen bliver endnu voldsommere, og undertrykket stiger yderligere. På et vist tidspunkt er der opbygget en slags ligevægt mellem undertrykket og den vandmængde, der er nødvendig for dilatationen. Herefter aftager undertrykket og den lodrette deformation i takt, indtil krybningen tilsidst holder et lille undertryk i prøven (bilag no.29).

Denne proces ligner optegnet i logaritmisk afbildning den almindelige konsolideringsproces, men det er karakteristisk, at den tager meget længere tid.

Det er derfor nødvendigt, hvis forsøget udføres med konstant hastighed, at udføre dette meget langsomt.

Grunden er, at hele prøven og ikke kun en smal brudzone skal bruge vand til udvidelsen. Herved kan man ikke anvende de normale deformationskriterier, men må regne med endnu længere tid.

Udrænede forsøg.

Udrænede forsøg er lette at udføre, således at deforma-

tionsmålingen bliver korrekt. Det er for vandmættede prøver kun et spørgsmål om at udføre forsøget så hastigt, at der ingen dræning kan finde sted.

Ønsker man derimod at kende spændingsforholdene under forsøget også, bliver problemerne straks meget større.

En forudsætning for at måle de effektive spændinger er, at porerne i prøven og filtrene er fuldstændig vandmættede, således at et lille overtryk et sted i porevandet straks forplanter sig til det ydre målesystem.

Den normale fremgangsmåde er at udføre forsøg med poretrykket nul ($CU_{u=0}$), d.v.s., at man varierer kammertrykket på en sådan måde, at der ikke finder volumenændringer sted. Resultatet afbildes i et styrkediagram - stempeltryk ($\sigma_1 - \sigma_3$) mod kammertryk - og hældningen her angiver teoretisk Skemptions poretrykskonstant A.

Der er imidlertid adskillige grunde til at tro, at det næppe er muligt at finde denne poretrykskonstant på overbevisende måde.

Der er for det første luft i filtrene. Specielt luft i overgangen mellem filtre og prøve kan, hvis porøsiteten er meget forskellig i de to stoffer, give større forskelle mellem trykket i porevandet og i det ydre system. Luften giver også en forsinkelse i trykkets udbredelse, således at det kan være nødvendigt at udføre forsøgene med nedsat deformationshastighed. Denne effekt vil nærmest gøre spændingskurven temmelig takket. Med de nye omfangsdræn skulle denne virkning være lille.

Filtereffekten er en meget vigtig fejlkilde, der ovenikøbet virker ensidigt.

Hvis der bliver overtryk i porevandet, sænkes kammertrykket for at undgå vandudpresning. Herved skal filtrene bruge vand, og det er ikke nødvendigt at sænke kammertrykket ret meget, før man ikke konstaterer nogen vandudpresning. Men den finder sted alligevel, vandet løber ud i filtrene. Senere, når prøven kommer i bruttilstand og søger at dilatere, suger prøven vand fra filtret, poretallet stiger, og styrken falder.

Filtereffekten erkendes let under forsøget, idet volumenmåleren reagerer hurtigt på de mindste ændringer i kammertryk.

På grund af filtereffekten bliver Skemptions A målt alt for lille.

For store tryk spiller membraneffekten ind. Man ser i for-

søgets første fase en vandudpresning, der blot er luft fra kammeret, der siver gennem membranen. Sidetrykket sænkes for hastigt. Man måler Skemptions A alt for stort. Det gælder iøvrigt for mange forsøgsserier, at membraneffekten trækker kurverne med store spændinger nedad i forhold til de andre. Tager man hensyn til disse kurver, måles \bar{c} for lille og $\bar{\phi}$ for stor.

Sammenligning af nyere forsøg i dansk triaxialapparat med ældre forsøg i instituttets normale apparater

Der er også i dette forskningsprojekt udført mange forsøg i det normale apparatur, men de fleste forsøg egner sig ikke til bestemmelse af morænelerets deformationsegenskaber.

Da sådanne kurvers værdi er meget tvivlsom, vil der derfor ikke blive vist deformationskurver for alle disse forsøg; men i stedet vil der blive udvalgt nogle typiske eksempler, og disse vil blive sammenlignet med de bedste forsøg, der er udført i det danske triaxialapparat.

Man vil derved få illustreret udviklingen i forskningsprojektet, samt de forsøgstekniske detaljer, der er gennemgået i forrige afsnit.

$CU_{u=0}$ -forsøg.

Eks.1, bilag no.30 - 31.

Dette eksempel viser både virkning af

1. Beddingeffekten
2. Ru trykhoveder, prøvedimension 2:1
3. Apparaturdeformationer

Prøven er ikke blevet forbelastet, men er kun konsolideret ved begyndelseskammertrykket σ_3^c . Forsøgene giver derfor udtryk for en temmelig stor beddingeffekt.

Det ses, at det almindelige forsøg giver 10 gange så store deformationer som det nye triaxialforsøg!

Eks.2, bilag no.32.

Dette eksempel viser virkningen af

1. Ru trykhoveder, prøvedimension 2:1
2. Apparatdeformationer

Disse prøver er blevet forbelastet til samme værdi, nemlig $\sigma_3 = 100 \text{ t/m}^2$, og man har derfor ikke megen beddingeffekt.

Der er på de ældre forsøg en apparattilpasningseffekt, fordi stemplet ikke finder til bunds i kugleskålen med det samme.

For det bedste, ældre forsøg gælder det, at σ_3 næsten ikke varierer, for $\sigma_1 - \sigma_3 = 20 \text{ t/m}^2$, og apparatdeformationen er derfor temmelig lille. Dette forsøg følger da også det nyere forsøg til denne værdi, men herefter spiller apparatdeformationen en voksende rolle, og tilsidst indtræder brudtilstanden for tidligt på grund af for stor prøvehøjde.

For det dårligste forsøg fås betydelig større deformationer, sikkert fordi prøven ikke har været præcist centreret, hvorved trykhovedet først skal bevæges sidelæns.

CD-forsøg.

Eks.3, bilag no.33.

Virkningen af ru trykhoveder og prøvehøjde 2:1.

Det ses ved sammenligning af sådanne forsøg med forsøg med glatte trykhoveder, at deformationerne fra starten bliver meget større for ru trykhoveder, hvilket vel vil sige, at tendensen til brudlinier dannes fra starten.

Begge disse forsøgsserier er udført i det ny apparatur.

M Å L I N G E R I M A R K E N

6. P R Ø V E O P T A G N I N G

Proveoptagningen foregår normalt med prøverør med en diameter på 3.5 cm. Er der sten i forsøgsmaterialet, kan forstyrrelsen nå en stendiameter ind i prøven. Man kan ved udtagelsen af prøven tit se temmelig dybe furer i prøven, tit kan denne falde fra hinanden på grund af et stenlag. Disse prøver er for små til morænelersprøver til triaxialforsøg, men kan anvendes til klassifikationsforsøg.

Anvendes en større prøveoptager, øges naturligvis chancen for en intakt kerne. Imidlertid kan det knibe med at få den nødvendige længde på prøven på grund af nedpresningsmodstand. Heldigvis er kravet til prøvehøjden blevet reduceret. Instituttets 7 cm prøveoptager er anvendt med held. Heraf kan man til-danne en 6 cm prøve.

For helt at eliminere risikoen for prøveforstyrrelser er prøverne i dette arbejde næsten alle udskåret af 14 x 14⁰ cm prøver, der er håndudskåret og tilvokset umiddelbart efter og opbevaret i tilvoksede blikdåser, hvorved fordampning næsten er undgået. Denne metode er dog meget tidsrøvende.

Ved selve prøvetildannelsen til konsolideringsforsøg må nødvendigvis fjernes de sten, der stikker ud af prøven; istedet for at fylde afskrallet materiale i hullerne fyldes disse med gips, hvorved en svækkelse af prøven undgås.

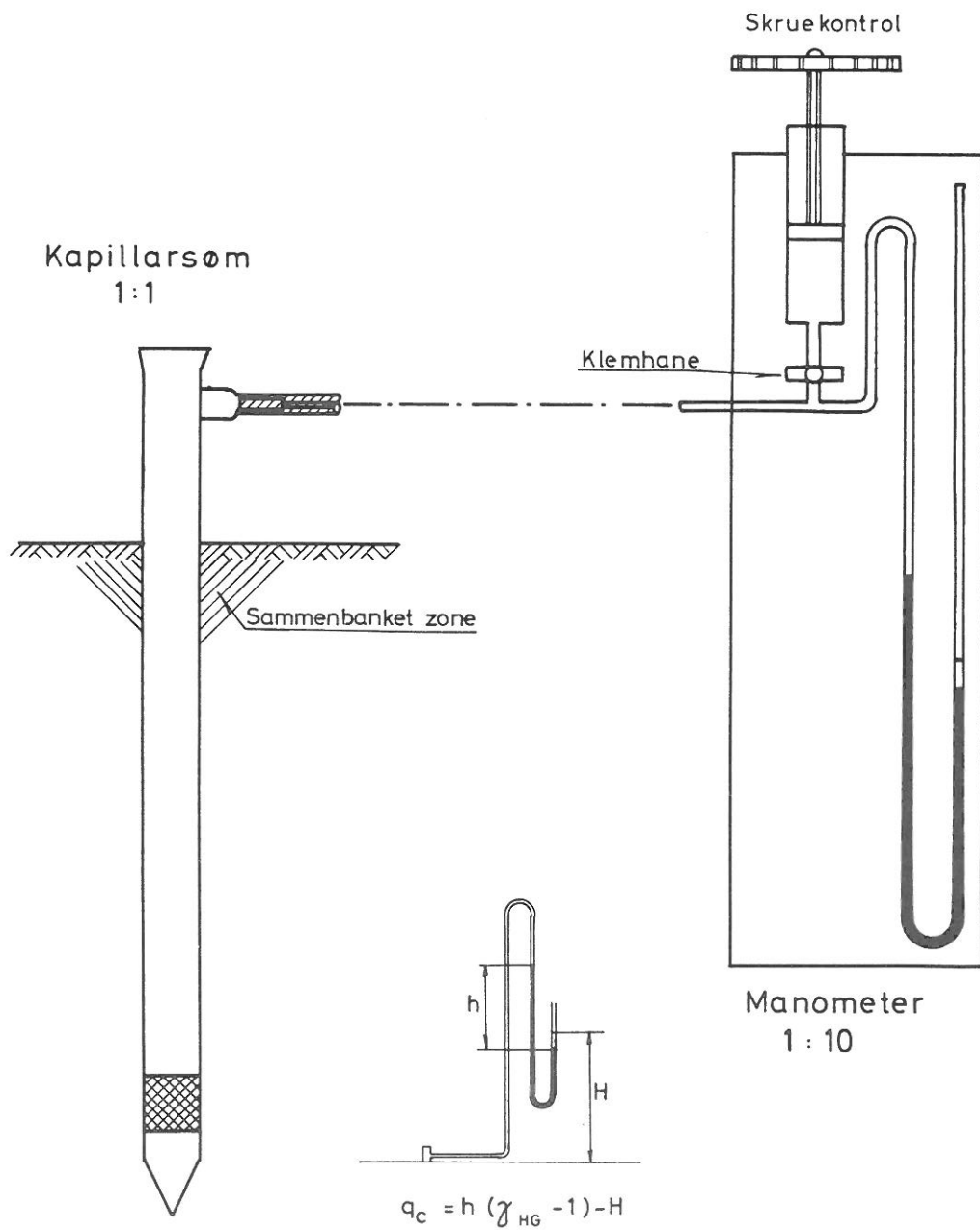
7. HÅNDVINGEFORSØGET

Håndvingen har vist sig at være et meget pålideligt værktøj til bedømmelse af den udrænedes forskydningsstyrke. Der er fundet god overensstemmelse med de andre målemetoder (pladeforsøg og simple trykforsøg), men den fundne værdi er dog ca. 10 % for stor, svarende til at man måler i en cirkulær tvangsflade.

Det er dog sådan for moræner, at mange af resultaterne påvirkes af sten i den fremtvungne brudflade. Det er dog normalt let at erkende disse, da arbejdskurven bliver meget ujævn. Disse forsøg er værdiløse og er derfor kasseret, og supplerende forsøg er udført.

For de meget kraftige moræner kan dette forsøg næsten ikke gennemføres på grund af det store stenindhold, og fordi disse styrker ligger i overkanten af det målelige. Måler man på denne måde i alle forsøg en vingestyrke over det målelige (72 t/m^2), kan den reelle forskydningsstyrke dog godt være så lille som 50 t/m^2 . Her er fejlen altså snarere 15-20 %.

System ved kapillarspændingsmålinger



KAPILLARSPÆNDINGSMÅLINGER

For tolkningen af pladeforsøg er det helt nødvendigt at kende det effektive spændingsniveau, der iøvrigt ikke må være for lille, fordi såvel styrkeegenskaber som deformationsegenskaber her varierer meget. Man kan derfor ikke nøjes med en udligning af kapillarspændingerne, men må forsøge at finde disse.

Kender man grundvandspejlets beliggenhed og morænelerets kapillaritet, er kapillarspændingerne (i m VS) enten lig med afstanden til grundvandspejlet eller lig med kapillariteten. En forudsætning er, at fordampningen fra overfladen er betydningsløs, hvad den sikkert er for almindelige bygværker med sand og muldrag omkring. For pladeforsøg renses en flade i moræneleret op, og den fordampning, der foregår herfra, betyder en forhøjelse af poreundertrykket. For pladeforsøg er det derfor nødvendigt at måle kapillarspændingerne.

Morænelers maksimale kapillare stighøjde ligger normalt mellem 2 m og 10 m (se bind I), og man kan derfor måle undertrykket ved at sætte porevandet i forbindelse med et kviksølvmanometer. Kunne undertrykket blive større end 10 t/m^2 , ville den her benyttede metode ikke kunne anvendes, idet man benytter almindeligt vand med opløst luft mellem porevandet og manometret. Metoden forudsætter endvidere en høj mætningsgrad af den anvendte jord for præcise målinger.

Det er endvidere et krav, at anbringelsen af måleren må være simpel, og at måleren må være nogenlunde robust.

Der blev konstrueret et kapillarsøm ca. 1 cm i diameter og ca. 20 cm langt; sømmet er spidset til forneden, og et par cm over spidsen er indskudt en filtersten, der gennem en langsgående kanal i sømmet står i forbindelse med et kviksølvmanometer. Der er endvidere indskudt en skruekontrol mellem kapillarsøm og manometer.

På figuren vises de to størrelser, der er målt, nemlig afstanden mellem kviksølvoverfladerne h og afstanden fra den frie vandoverflade til jordoverfladen H .

For at sikre tilslutning mellem porevand og manometer, er det helt nødvendigt, at der ikke er luft i systemet under må-

lingen. Det sikres ved hjælp af skruekontrollen ved gennemskylning af systemet, før kviksølv fyldes i manometererrøret. Ligeledes presses vand gennem filtret under anbringelsen. Tilsidst slås jorden sammen omkring sømmet for at sikre, at der ikke bliver utætheder langs dette og for at lukke opståede revner. Skruekontrollen kobles fra ved at lukke slangeklemmen, og jorden suger nu det overflødige vand samt en lille vandmængde fra manometret. I moræner tager det 10-15 timer, inden balance er opnået. Muligheden for hurtigere målinger er til stede, men er ikke udnyttet.

De maksimalt målte værdier er $q_c = 2.5 \text{ t/m}^2$. Utætheder erkendes let, q_c måles til 0 t/m^2 .

I laboratoriet er forsøgt at kalibrere metoden. En intakt prøve ca. $15 \times 15^0 \text{ cm}$ blev placeret på en filtersten og omsluttet med en gummimembran. Det hele blev indstøbt i gips for at undgå sprækker under nedramningen af kapillarsømmet. Undertrykket blev simpelt fremstillet ved forskellen i højden mellem prøven og den fri vandoverflade. Nedenfor er angivet de målte og de påførte undertryk. I marken er en enkelt måling blevet kontrolleret. Denne gav værdien 0.30 t/m^2 , hvorfor der blev gravet 35 cm ned under overfladen, og hullet blev dækket for at undgå fordampning. Dagen efter stod der netop så meget vand som målt.

Undertryk t/m^2	Målt undertryk t/m^2
0.53	0.53
1.07	1.15
1.68	1.70
2.30	2.28

9. PLADEBELASTNINGSFORSØG

I M A R K E N

I dette afsnit vil pladeforsøgene først blive omtalt principielt, og der vil blive redegjort for forsøgsteknikken. Herefter vil der blive redegjort for det udviklingsarbejde, der har været i denne forbindelse.

Ved pladebelastningsforsøg i marken må der skelnes mellem deformationsforsøg og brudforsøg. For brudforsøgene må der endvidere skelnes mellem korttids- og langtidsforsøg.

Almindelig forsøgsteknik

Forsøgene er næsten alle udført på cirkulære plader. Undtagelsen er nogle få udrænedede pladeforsøg på Carlsberg, der blev udført på kvadratiske plader. Pladerne er så tykke, at de kan regnes for fuldstændig stive. Charnier umiddelbart over plade.

Forsøgsarealet regnes normalt at skulle være ca. 7 x diameteren, et krav der dog vanskeligt kan opfyldes for store plader. Her er af og til benyttet forsøgsområder ned til 5 D i diameter. Ved at anvende almindeligt graveværktøj revner jorden, og den sidste afretning foretages derfor med murske, så man får en helt plan flade. Herved lettes placeringen af pladen, der naturligvis skal stå på en stenløs flade. Efter forsøget graves op under pladen, og eventuelle sten under pladen indmåles.

Pladen må støbes fast til leroverfladen for at undgå beddingeffekt. For små plader kan anvendes gips eller rapidcement. Store plader kan direkte støbes in situ.

Endvidere må man kende spændingsniveauerne i jorden. For det første må man vide, om aflastningen fra afgravningen er effektiv. For det andet må man kende grundvandets indflydelse. Det mest hensigtsmæssige er et grundvandspejl noget under forsøgsniveau (eks. 0.5 m), som man kan måle. Ellers kan man påføre overfladelast i form af sand og herefter sætte forsøgsarealet under vand. Forsøgsteknikken er vanskelig. Endelig kan man forsøge at måle kapillarspændingerne, der dog kan variere

meget under forsøget. Der er udviklet udstyr til sådanne målinger.

Det må understreges, at man ikke løser problemerne ved vandtilsætning på overfladen alene. Den aflastning, man her ved foretager, bliver meget langsom, fordi stivheden ved små spændinger er lille og dræntiden derfor lang. Poretallet kan blive så stort efter et par dage, at styrken og stivheden er aftaget meget.

Fordampning fra overfladen bør forhindres, idet kapillarspændingerne også afhænger af fordampningshastigheden. Dette kan gøres ved at udlægge et sandlag på f.eks. 5 cm tykkelse. Der er også forsøgt at udlægge et stykke plastik over overfladen. Herved opnåedes kun, at det vand, der fordampede, opblødte overfladen pletvis (forsøg Al-A3, Kratbjerg).

Deformationsmålinger foregår fra målebjælker, der er fastgjort uden for forsøgsarealet på nedbankede profiler. Af hensyn til temperatursvingninger fastgøres målebjælkerne helt nede ved forsøgsniveau. Hvis man har påført overfladelast, da lige over denne; disse forsøgsopstillinger egner sig kun til brudforsøg.

Overfladelast påføres bedst med sand. Skal overfladelasten være temmelig stor, kan der udlægges jernbarrer eller lignende over sandlaget.

I det ældre forsøgsmateriale indgår ikke en bestemmelse af kapillarspændingerne. For nogle forsøgsserier har man dog sat overfladen under vand. Ligeledes har man ikke konsekvent understøbt pladerne, i stedet har hver plade stået på en filtersten, hvorved man formodentlig har en ikke ubetydelig beddingeffekt. Disse forsøg er derfor ikke refereret i denne afhandling, dog er medtaget forsøg fra en konsultativ sag fra Sabro, idet de første pladeforsøg i dette arbejde er udført i forlængelse af disse.

Brudforsøg

Brudforsøg udføres med konstant deformationshastighed, fordi dette giver en mulighed for en konsekvent bruddefinition.

Skal forsøget udføres udrænet, benyttes donkraft, hvorved pladen kan nedtrykkes så hurtigt som praktisk muligt. Ved fotoregistrering kan forsøgstiden nedsættes til et par minutter

pr. forsøg. Kraften aflæses på en måleenhed, der er indskudt mellem donkraft og plade, hvorved friktion i donkraft ikke får nogen indflydelse.

Ved drænede brudforsøg anvendes for små belastninger markspindler, der trækkes af en elektromotor. For større belastninger anvendes donkrafte i forbindelse med en oliepumpe, hvis kapacitet ligger fra 0-5 liter pr. time. Forsøgshastigheden afpasses således, at begyndelsesdeformationerne er de samme som for drænede forsøg udført med belastningstrin. Herved fås en deformationshastighed på ca. 0.2 % i timen. Bruddeformationen vokser med brudspændingen inden for forsøg på samme jordart. Det er derfor normalt nødvendigt at udføre brudforsøg, indtil $\delta/D = 15-20 \%$.

For moræneler er det ikke muligt at bestemme γ -leddet, idet dette for almindelige pladestørrelser kun udgør et par procent af den samlede bæreevne. Man foretrækker derfor normalt at anvende små plader til brudforsøg.

Deformationsforsøg

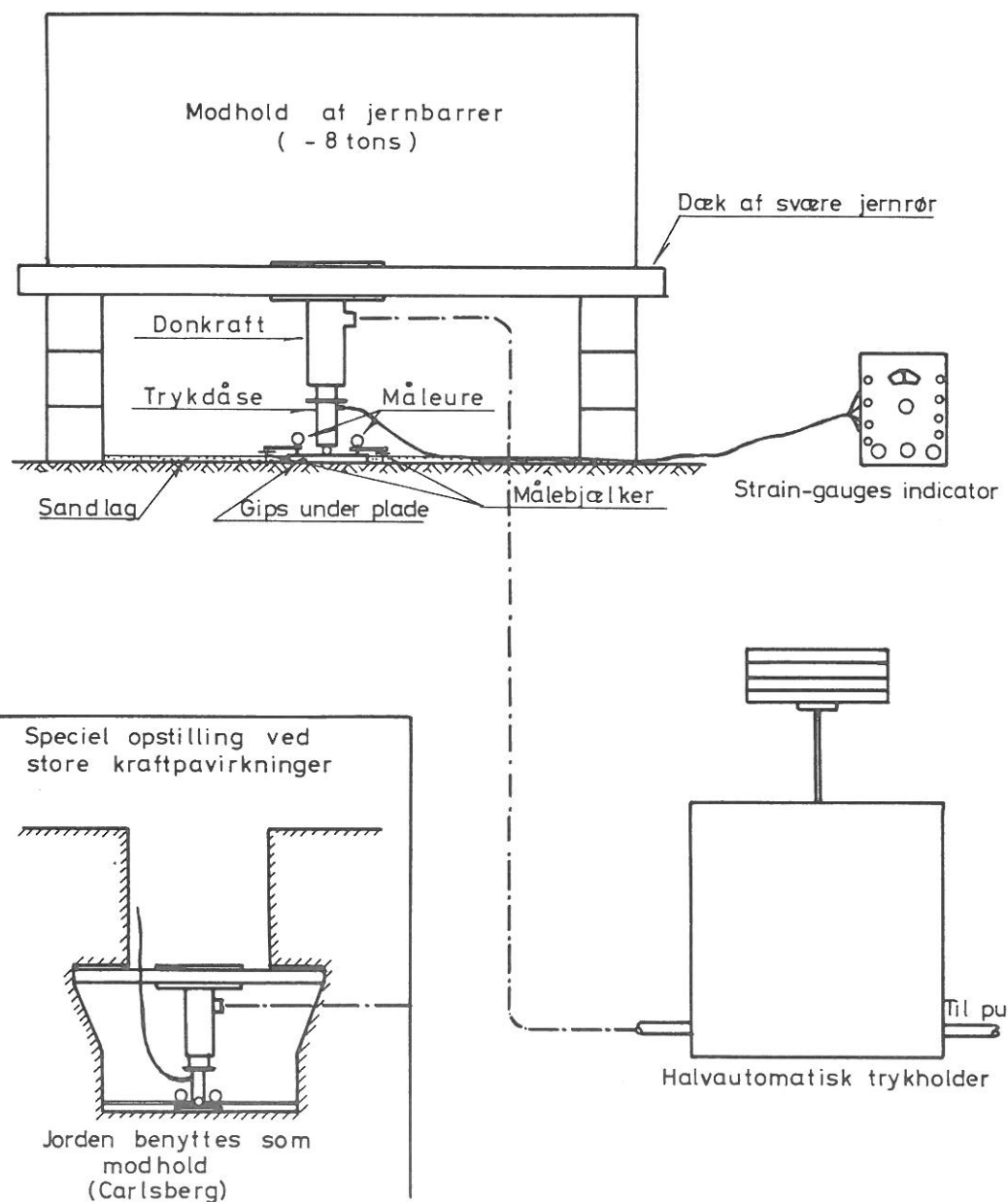
Deformationsforsøgene udføres med konstante belastningstrin og tidskurver. Herved fås foruden deformationsmålingen, en måling af konsolideringstiden og krybningen. Tidskurverne er dog langt fra pæne i alle forsøg. For større spændinger influerer det ene trin på det næste trins udseende. Man kan herved let få jævnt krumme kurver uden "vending". For større spændinger (over 50 % brudspænding) er denne forsøgstype derfor ikke særlig velegnet.

For små plader udføres forsøget ved direkte belastning med lodder gennem en trykstang.

For større plader er det nødvendigt at anvende vægtarmsprincippet. Den normale udveksling er 1:10. Det er nødvendigt at etablere modhold. Dette har normalt været et dæk bestående af svære jernrør, der hviler på gasbetonsten. På dækket placeres jernbarrer eller sække med jord. Denne del af forsøget er meget tidsrøvende. Under dækket kan fastspændes anslag til vægtarmen.

For at undgå for store spændinger i jorden fra modholdet, er det nødvendigt at etablere det i takt med belastningen på pladen.

Opstilling af pladeforsøg med trykholder



Forventes belastningen at kunne overskride 1 ton, anvendes et hydraulisk system, bestående af en trykholder og en donkraft. Herved kan man uden vanskelighed frembringe belastninger på op til 50 tons, altså betydelig større end det normalt udførte modhold.

En speciel måde at frembringe modholdet på blev udført på Carlsberg, hvor forsøgene blev udført i en 2 m dyb grav. En meter nede blev modholdet placeret, således at det gik ind i gravens sider. Herved skulle der frembringes et liniebrud af modholdet, før dette svigtede. Forudsat af jorden var lige så stærk i gravens sider som i bunden, kunne man udføre brudforsøg med en 25 cm plade med en modholdssikkerhed på 2.

Kombinerede forsøg

Anvendes det hydrauliske system, er det muligt at udføre forsøgets første del med tidskurver og konstante belastningstrin og ved indkobling af en oliepumpe at udføre den sidste del med konstant hastighed.

Med lodbelastning kan man udføre et deformationsforsøg, aflaste og derefter udføre et brudforsøg med konstant hastighed med markspindlen.

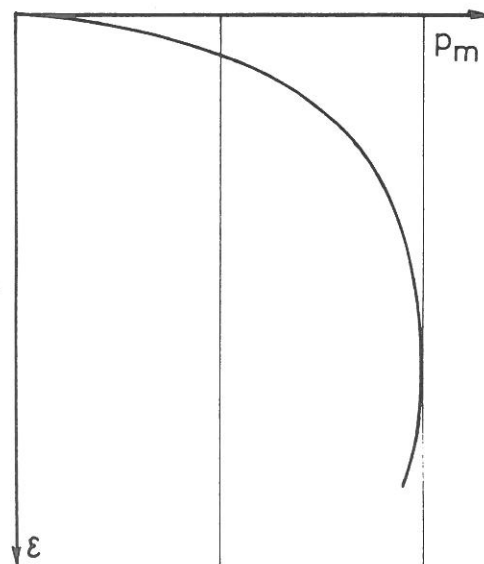
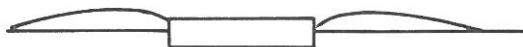
Endelig er det muligt at udføre "multiple stages"-brudforsøg, idet man efter brudforsøget kan aflaste og ændre overfladelasten, hvorefter et nyt forsøg udføres. Herved kan styrkeparametrene bestemmes ved hvert forsøg. Det er dog en betænkelig sag, fordi man ikke kan undgå, at poretallet ændres ved dilatation i brud.

Arbejdskurvens udseende

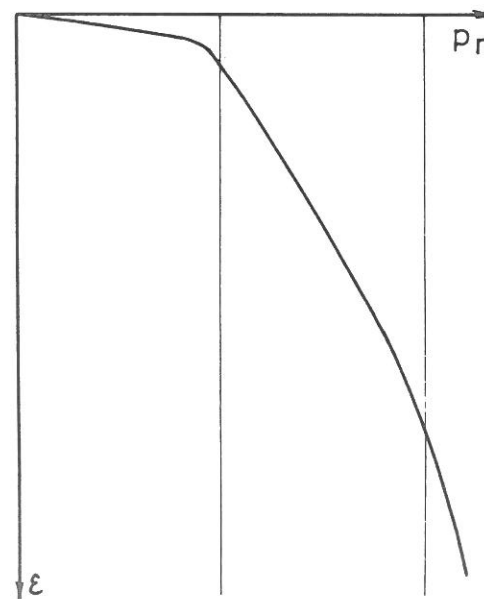
På moræneler kan det ikke undgås, at der er betydelige inhomogeniteter i jorden. Pladen kan derved kæntrre temmelig kraftigt. Kæntringen af pladen kan også være en følge af skævheder i opstilling.

Det er konstateret, at arbejdskurvens form afhænger meget af, om pladen er kæntrret eller ej. Hvis pladen kæntrer, vil man måle meget store deformationer fra kæntringens begyndelse, karakteriseret ved et "knæpunkt" på arbejdskurven. Dette

Vellykket pladeforsøg
 Ingen kæntring af plade
 $P_{br} = \max. P_m$



Kæntring af plade
 Knæpunkt på arbejdskurve
 Intet maximum



knækpunkt ligger normalt omkring $0.5 p_{br}$, afhængig af kæntringens størrelse. Arbejdskurven får ikke noget maksimum, måske på grund af forøget dybdevirkning på kæntringssiden.

Føres denne erfaring over på almindelig fundering, kan man ikke tillade en totalsikkerhed på mindre end 3. For store fundamenter kan der lettere være inhomogeniteter i form af lokalt svagere områder, og overfladebelastningen vil være temmelig ujævn (bygninger i nærheden etc.).

Kæntringens størrelse kan måles ved at placere 3 måleure pr. plade.

Konstruktionsarbejde i forbindelse med pladeforsøg

På grund af ønsket om at kunne udføre alle forsøgene med relativt små forsøgsoptstillinger blev der tidligt påbegyndt konstruktionen af et hydraulisk system med konstant tryk. Til dette arbejde har Statens teknisk videnskabelige Fond ydet kr.25.000, hvoraf ca. kr.10.000 er benyttet til et automatisk registreringsudstyr. Disse ting vil blive omtalt nærmere på de følgende sider. Her vil også blive omtalt det apparatur, der er udviklet til forsøg med konstant hastighed, hvori indgår indkøb af en oliepumpe med kapacitet 0-5 liter pr. time. Dette indkøb blev også muliggjort af midlerne fra Statens teknisk videnskabelige Fond.

Automatisk registrering

Aflæsningen af apparaturet foregår normalt manuelt, men for forsøg med konstant hastighed vil det være af stor betydning at kunne aflæse døgnet rundt med visse konstante mellemrum. Det vil ligeledes være fordelagtigt at kunne få præcise og hurtige aflæsninger ved forsøg, der dræner meget hurtigt, eller ved udrænede pladeforsøg.

Der er valgt at anskaffe et fotografisk registreringsudstyr, fordi dette kan fås meget robust. Det fylder ikke så meget som skrivere, og det giver samtidig aflæsning af alle måleure.

Man valgte et Schackmann registrerkamera, der er forsynet med kassetter til store mængder film, og drives elektrisk med en spænding på 12 volt (akkumulator). En nummereringsanordning

fotograferer et nummer og en etikette ind på billedet til identificering. Der er bygget en automatisk intervalvælger i forbindelse med et intervallometer. Herved kan registreres med følgende intervaller: 2,5 - 5 - 15 og 60 min., og med intervalvælgeren tilsluttet kan der skiftes automatisk mellem intervallerne, så der bliver længere og længere imellem disse. Apparatet kan også udløses mekanisk eller med hånden (se foto no.13).

Det var nødvendigt yderligere at anskaffe mørkekammerudstyr for fremkaldelse af store længder film samt et aflæsningsapparat.

Der var desværre temmelig mange begyndelsesvanskeligheder, idet de forskellige apparatdele ikke passede sammen. Det er i orden nu, men betød, at det ikke blev til så stor hjælp for dette projekt som oprindelig tilsigtet.

Det hydrauliske trykholdersystem.

For at kunne anvende GI's donkraftsystem måtte man allerførst have et målesystem til kraften, idet man i donkraftens manometer kun havde et temmelig groft målesystem. Man valgte her trykdåser med strain-gauges, og da de eksisterende fabrikater var temmelig dyre, blev der konstrueret en serie.

Hver måledåse er vandtæt udført og meget robust i konstruktionen. På foto no.14 ses hele serien, der omfatter måledåser med maksimalmåleevne 2-4-8-15-30 og 50 tons. Den største har dog ikke været nødvendig til dette formål. Se kalibreringer på bilag no.34-39.

Måledåserne placeres i opstilling mellem donkraft og plade, således at man direkte måler den overførte kraft (altså uden stempelfriktioner).

Det næste blev herefter at konstruere en trykholderenhed, som kunne holde olietrykket konstant i længere tidsrum.

Man forsøgte naturligvis først, om eksisterende systemer kunne anvendes - således f.eks. et system, der fungerede med komprimeret luft.

Det viste sig imidlertid, at systemet kun kunne bruges inden for den midterste halvdel af hver arbejdsperiode, men såvel udløsningstrykket som starttrykket afveg overmåde meget fra den konstante del. Hver periode var højst nogle få minutter.

Også systemer med kontinuert arbejdende pumper og vindked-

ler måtte opgives, fordi stempelstødene ikke kunne holdes på et rimeligt lille niveau, hvis man samtidig skulle have et handy udstyr.

Man forsøgte sig derfor med en konstruktion med en meget langsom arbejdsrytme, så langsom at en tidsskurve kunne placeres inden for en enkelt periode.

Hertil anvendes en cylinder med et slagvolumen på 20 cm^3 olie. Man belaster stemplet, der er 1 cm^2 i areal, med lodder og opnår derved det nødvendige tryk. Stemplet er forsynet med så mange O-ringe, at det maksimale arbejdsstryk ligger på 200 atm. Der er to udgange på cylinderen - en udgang til donkraften og en udgang til en pumpe, der kan forsyne stemplet med den nødvendige oliemængde. (Bilag no.40).

Det viste sig hurtigt, at det var nødvendigt at forsyne trykholderen med roterende stempel for at udjævne stempelfriktionen. Herved blev systemet en smule større, fordi der nu skulle anvendes en elektromotor samt et drev, der ikke overførte lodrette kræfter til stemplet.

Det beskrevne system viste sig at fungere med en præcision på et par procent - i heldigere tilfælde endnu bedre.

Det blev iøvrigt forsøgt at konstruere endnu en trykholder med det halve stempelareal og mindre slaglængde, da systemet var unødvendigt stort til små pladeforsøg. Dette system kom også til at fungere, men viste sig mindre robust.

Under normale omstændigheder pumpes den nødvendige oliemængde ind i trykholderen med en håndpumpe, hvorved man opnår at kunne påføre den korrekte belastning på et minimum af tid (f.eks. 4 tons på 2 sekunder). Herefter er det nødvendigt at holde systemet under kontrol de første minutter for at lægge det præcise antal lodder på stemplet. (Friktionen kan skifte noget fra gang til gang, således at belastningen også skifter en smule). Herefter overtager trykholderen indpumpningen af olie i donkraften. For de største belastningstrin kan der være tale om at pumpe olie ind i trykholderen, fordi denne udløber. Man har da blot at spærre til donkraften under denne procedure.

For drænedes brudforsøg, hvor man ønsker at udføre forsøget med konstant deformationshastighed, kan en elektrisk pumpe tilsluttes. Dennes ydeevne kan reguleres fra 0-5 liter i timen temmelig præcist.

Efter denne anskaffelse er det muligt at udføre drænedes

pladeforsøg med tidskurver i begyndelsen og derefter gennemløbe selve bruddet med konstant hastighed.

Markspindler.

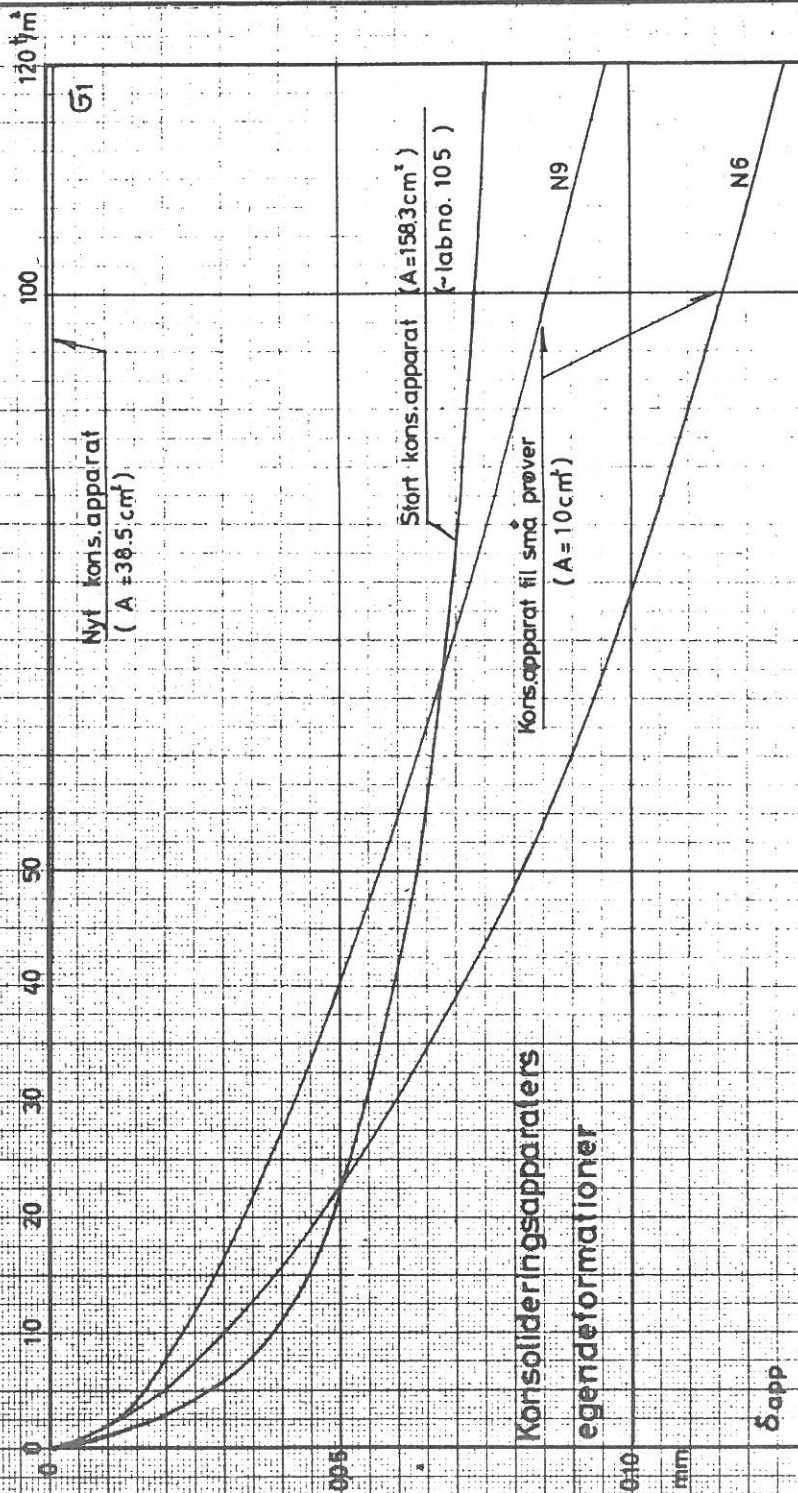
Til brug ved drænede eller udrænede brudforsøg med små plader er der konstrueret to spindler, der er så godt indkapslede, at de kan anvendes ude. Det maksimale tryk, der kan præsteres af disse, er på 3-4 tons. De har dog sjældent været anvendt ved større tryk end 500 kg. Spindlerne har en udveksling på 1:120 og kan drives af en mindre elektromotor.

Andre benyttede belastningsmetoder

Ved drænede forsøg med belastningstrin kan man benytte endnu en metode, der er temmelig enkelt. Modholdsarrangementet kan støtte på ialt tre punkter. I nærheden af tyngdepunktet kan indskydes en donkraft mellem plade og modhold. Ved nu at pumpe donkraften langt ud løftes modholdet og drejer om de to understøtningspunkter. Den vægt, der påføres pladen, er konstant, men til gengæld må man aflaste mellem hvert trin og påføre modholdet større vægt.

Denne fremgangsmåde er benyttet ved et Sabro-forsøg samt ved Rigshospital-forsøgene (op til 20 tons).

På fotografierne nc.14 -16 er vist en række forsøgsopstillinger, hvor de omtalte metoder og apparater er anvendt.

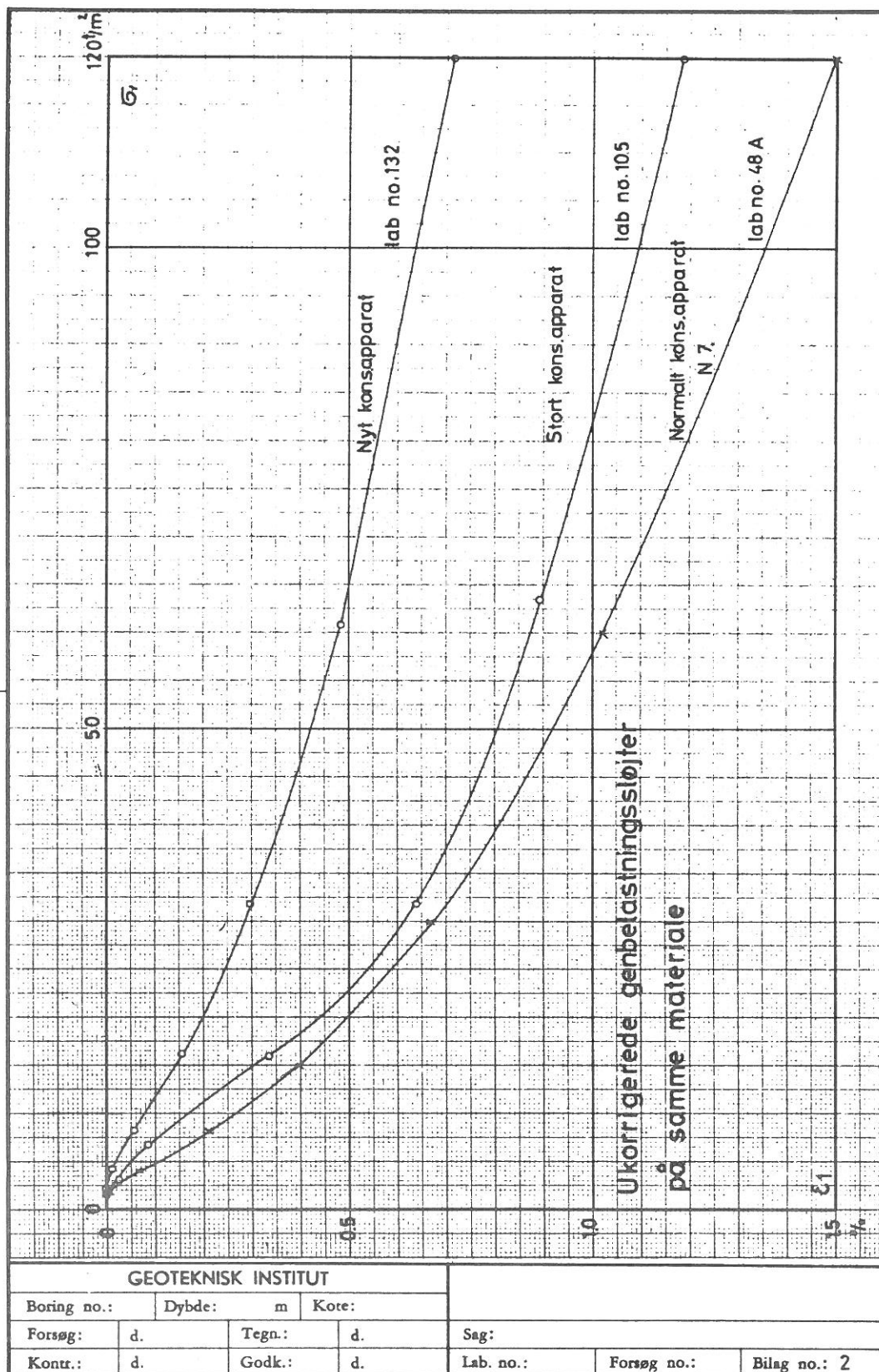


GEOTEKNISK INSTITUT

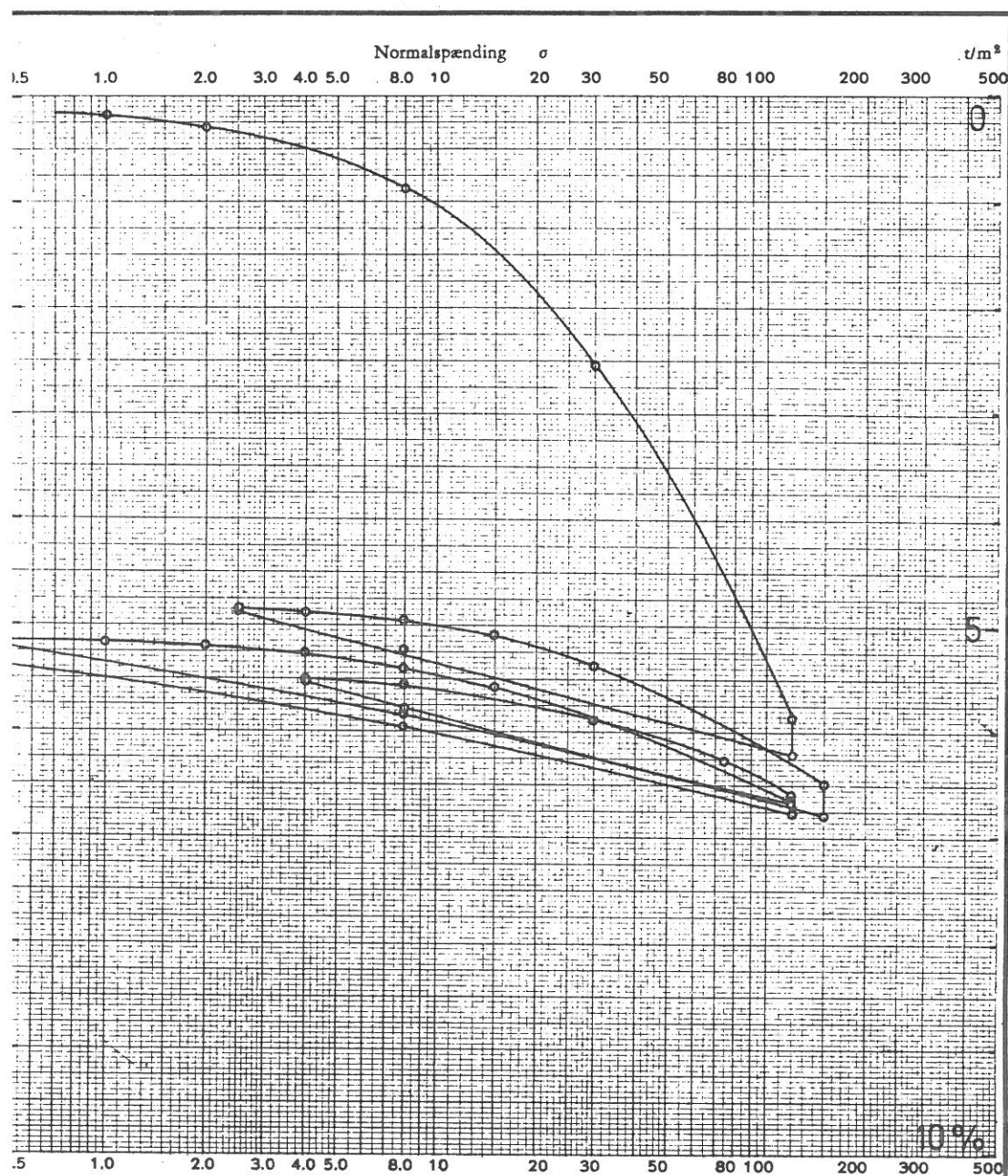
Boring no.: Dybde: m Kote:

Forsøg: d. Tegn.: d. Sag:

Kontr.: d. Godk.: d. Lab. no.: Forsøg no.: Bilag no.: 1



GEOTEKNISK INSTITUT						
Boring no.:	Dybde:	m	Kote:			
Forsøg:	d.	Tegn.:	d.	Sag:		
Kontroll:	d.	Godk.:	d.	Lab. no.:	Forsøg no.:	Bilag no.: 2



Permeabilitetskoefficient k

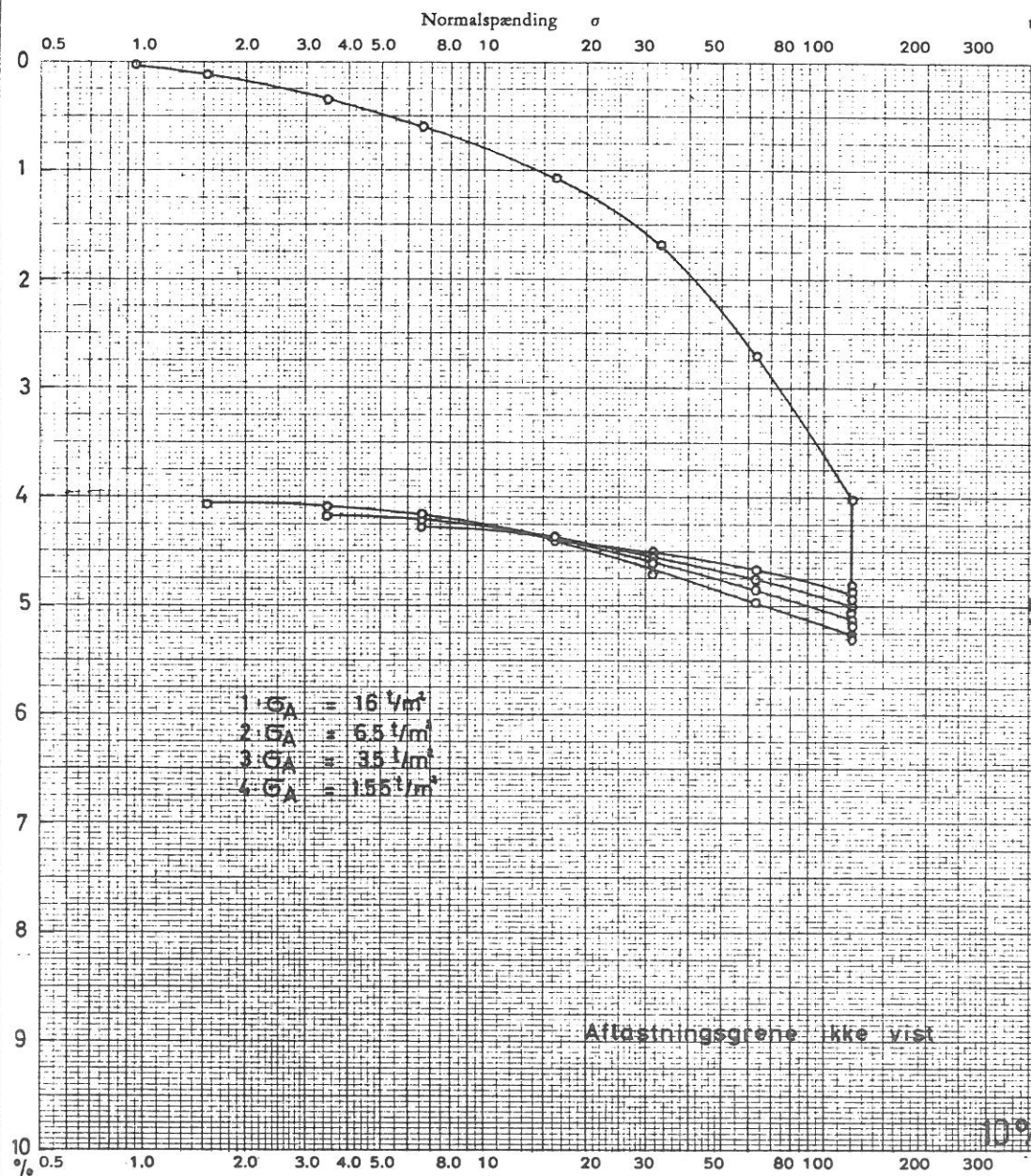
10^{-} m/s

Konsolideringskoefficient c_v

10^{-} m²/s

sk konsolideringsapparat N5

højde	2	cm	Jordart: Moræner Kratbjerg	
areal	10	cm ²		
antal før konsolidering	0.33		GEOTEKNISK INSTITUT	
tvægt før konsolidering	227	t/m ³		
dindhold før konsolidering	11.7	%	Forsøg:	d.
dindhold efter konsolidering	9.94	%	Tegn.:	Kontr.:
ænet forskydningsstyrke	2.0	t/m ²	Godk.:	d.
lodret, effektiv spænding in situ	2.5	t/m ²	Boring no.:	
			KONSOLIDERINGSFORSØG	
			Sag: F ¹ /61	
			Kote:	Lab. no.: 30
			Dybde:	Bilag no.: 3

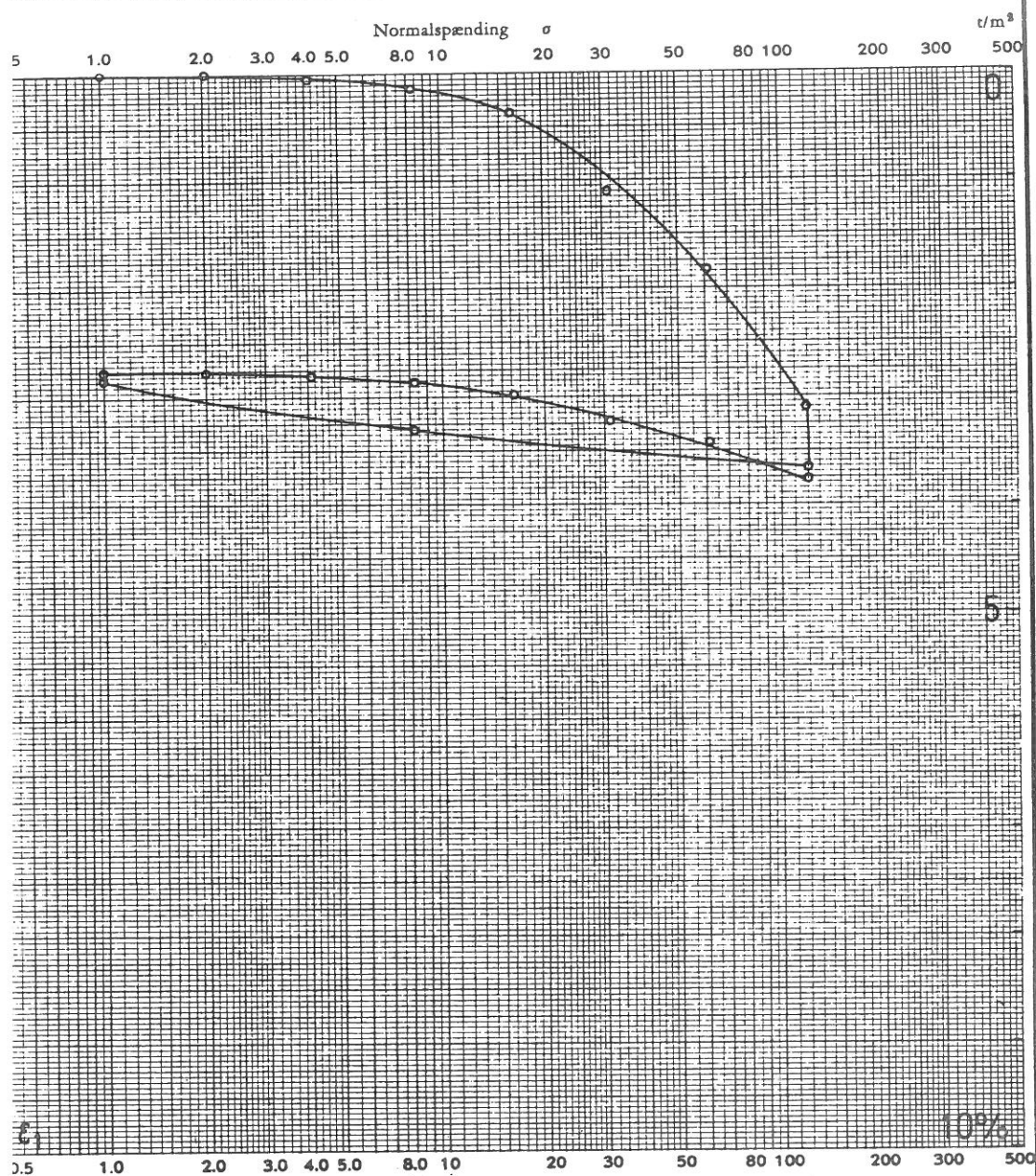


Permeabilitetskoefficient k 10^{-} m

Konsolideringskoefficient c_v 10^{-} m

Stort konsolideringsskema

Prøvehøjde	4.9	cm	Jordart: Moræneler Kratbjerg	
Trykareal	158.3	cm ²		
Poretal før konsolidering	0.34		GEOTEKNISK INSTITUT	
Rumvægt før konsolidering	-	t/m ³		
Vandindhold før konsolidering	-	%	Forsøg:	d.
Vandindhold efter konsolidering	10.7	%	Tegn.:	Kontr.:
Udrænet forskydningsstyrke	20	t/m ²	Godk.:	d.
σ_0 = lodret, effektiv spænding in situ	~1-2	t/m ²	Boring no.:	Kote:
				Dybde: m
				Lab. no.: 101
				Bilag no.: 4



konsolideringsapparat

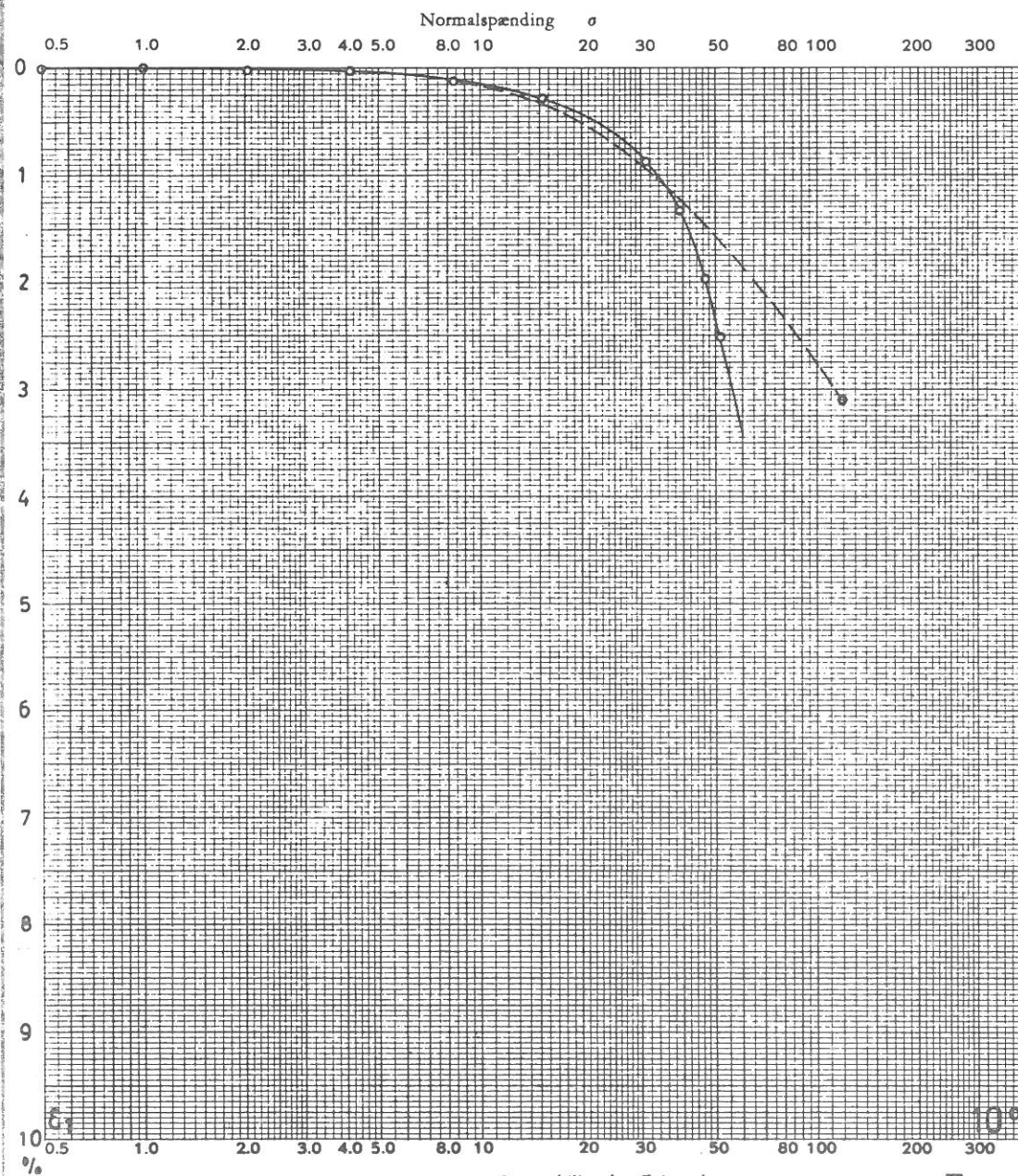
Permeabilitetskoefficient k

10^{-7} m/s

Konsolideringskoefficient c_v

10^{-7} m²/s

vejhøjde	3.5	cm	Jordart: Moræner		Forsøg no. 2	
areal	38.5	cm ²	Kratbjerg			
retal før konsolidering	0.34		GEOTEKNISK INSTITUT		KONSOLIDERINGSFORSØG	
mvægt før konsolidering	2.26	t/m ³			Sag: F ¹ /61	
ndindhold før konsolidering	11.3	%	Forsøg:	d.		
ndindhold efter konsolidering	11.3	%	Tegn.:	Kont.:		
læret forskydningsstyrke	20	t/m ²	Godk.:	d.	Kote:	Lab. no.: 126
= lodret, effektiv spænding in situ	~1 - 2	t/m ²	Boring no.:		Dybde: m	Bilag no.: 5



Permeabilitetskoefficient k

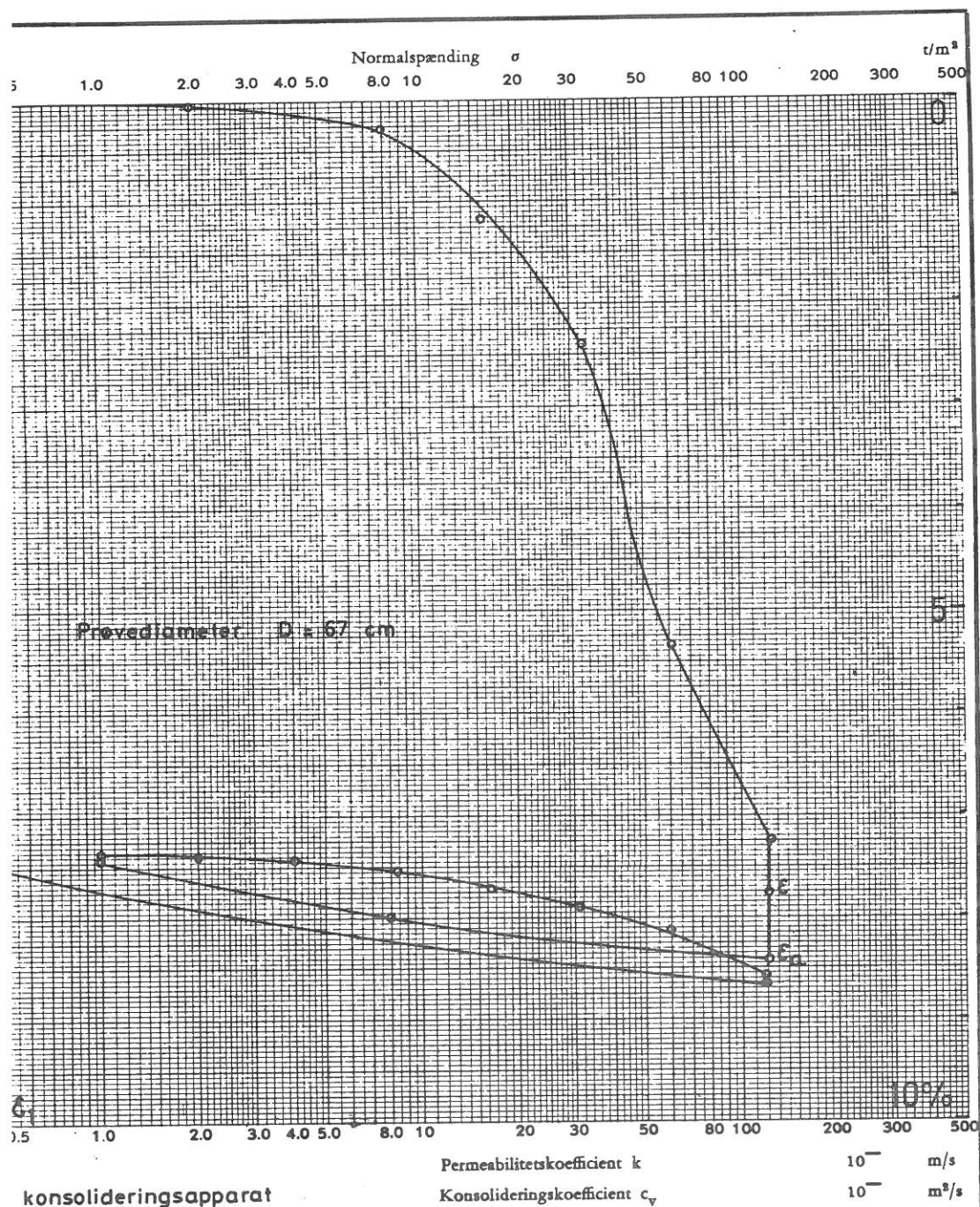
10^{-} r

Konsolideringskoefficient c_v

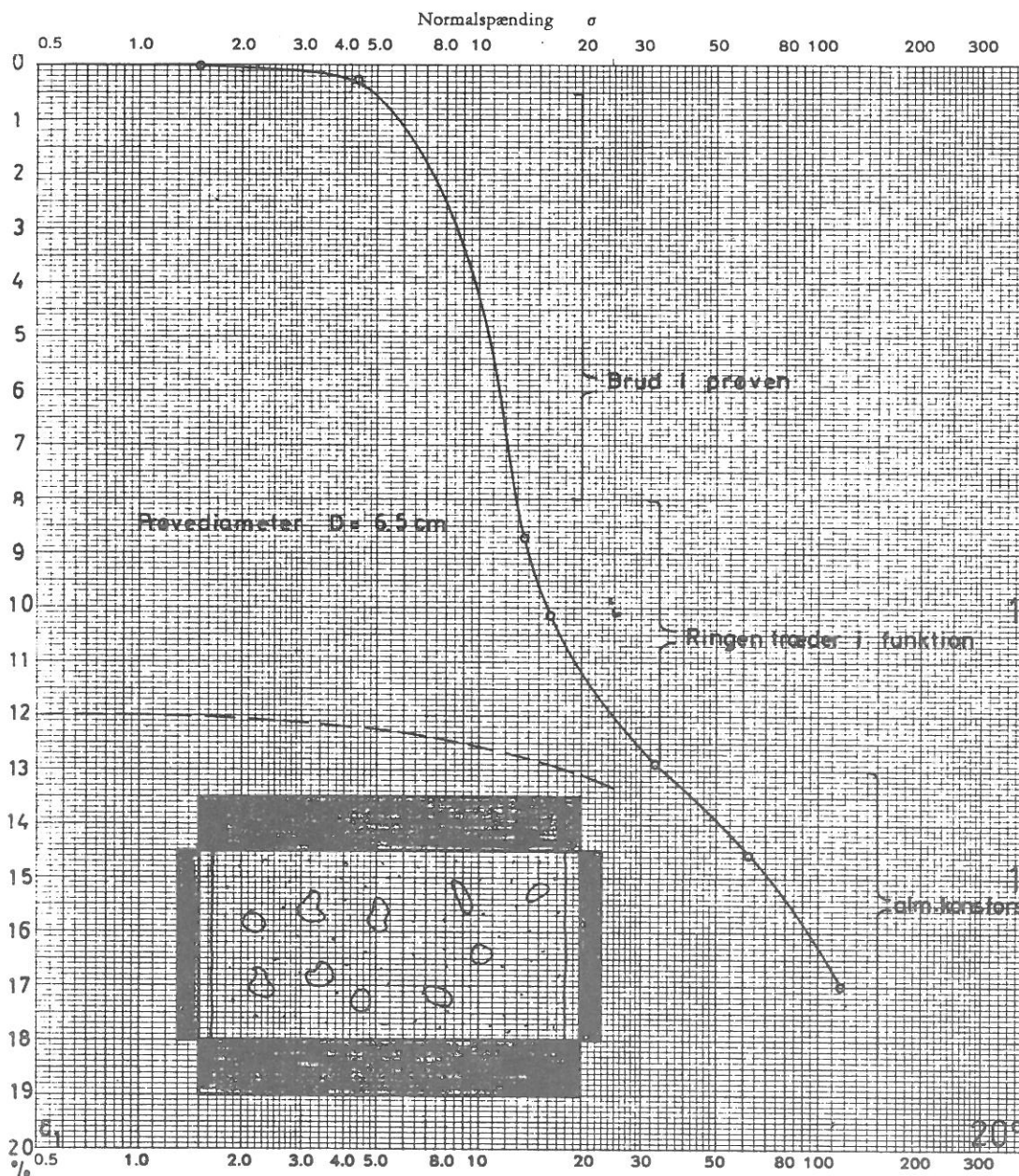
10^{-} r

Nyt konsolideringsapparat

Prøvehøjde	3.5	cm	Jordart: Moræneler		Forsøg no. 9	
Trykareal	38.5	cm ²	Kratbjerg			
Poretal før konsolidering	~0.34		GEOTEKNISK INSTITUT		KONSOLIDERINGSFORSØ UDEN RING	
Rumvægt før konsolidering	2.21	t/m ³				
Vandindhold før konsolidering	11.75	%	Forsøg:	d. 6/5 - 64	Sag: F 1/61	
Vandindhold efter konsolidering	11.30	%	Tegn.:	Kontr.:		
Udrænet forskydningsstyrke	~20	t/m ²	Godk.:	d.	Kote:	Lab. no.: 126
σ_0 = lodret, effektiv spænding in situ	~1 - 2	t/m ²	Boring no.:		Dybde:	m Bilag no.:



vejhøjde	3.5	cm	Jordart: Moræner	Forsøg no. 10	
areal	38.5	cm ²	Kratbjerg		
retal før konsolidering	0.34		GEOTEKNISK INSTITUT		KONSOLIDERINGSFORSØG
mvægt før konsolidering	224	t/m ³	Forsøg: OHP d.		Sag: F 1/61
ndindhold før konsolidering	11.7	%	Tegn.:	Kontr.:	
ndindhold efter konsolidering	11.7	%	Godk.:	d.	Kote:
retet forskydningsstyrke	~20	t/m ²	Boring no.:		Lab. no.: 134
= lodret, effektiv spænding in situ	~2	t/m ²			Dybde: m Bilag no.: 7



lyt konsolideringsapparat

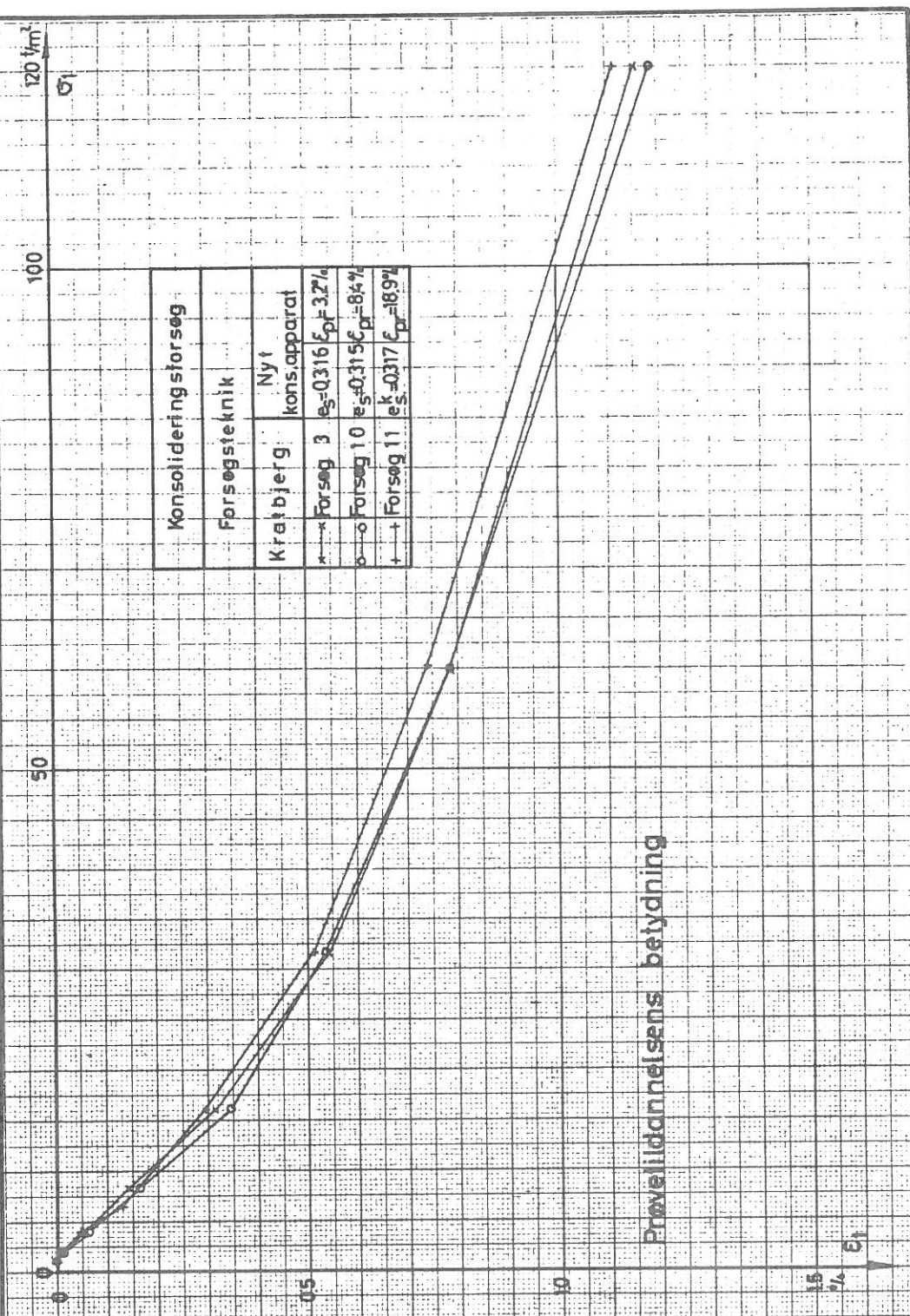
Permeabilitetskoefficient k

10^{-1} m

Konsolideringskoefficient c_v

10^{-1} m

Prøvehøjde	3.5	cm	Jordart: Moræneler	Forsøg no 11	
Trykareal	38.5	cm ²	Kratbjerg		
Poretal før konsolidering	0.34		GEOTEKNISK INSTITUT		KONSOLIDERINGSFORSØG
Rumvægt før konsolidering	2.24	t/m ³	Forsøg: OHP d.		Sag: F1/61
Vandindhold før konsolidering	12.55	%	Tegn.:	Kontr.:	
Vandindhold efter konsolidering	12.60	%	Godk.:	d.	Kote:
Udrænet forskydningsstyrke	~20	t/m ²	Boring no.:		Lab. no.: 13
σ_0 lodret, effektiv spænding in situ	~2	t/m ²			Dybde: m Bilag no.: 1



Prøvelidannelsens betydning

GEOTEKNISK INSTITUT

Boring no.: Dybde: m Kote:

Forsøg: d. Tegn: d.

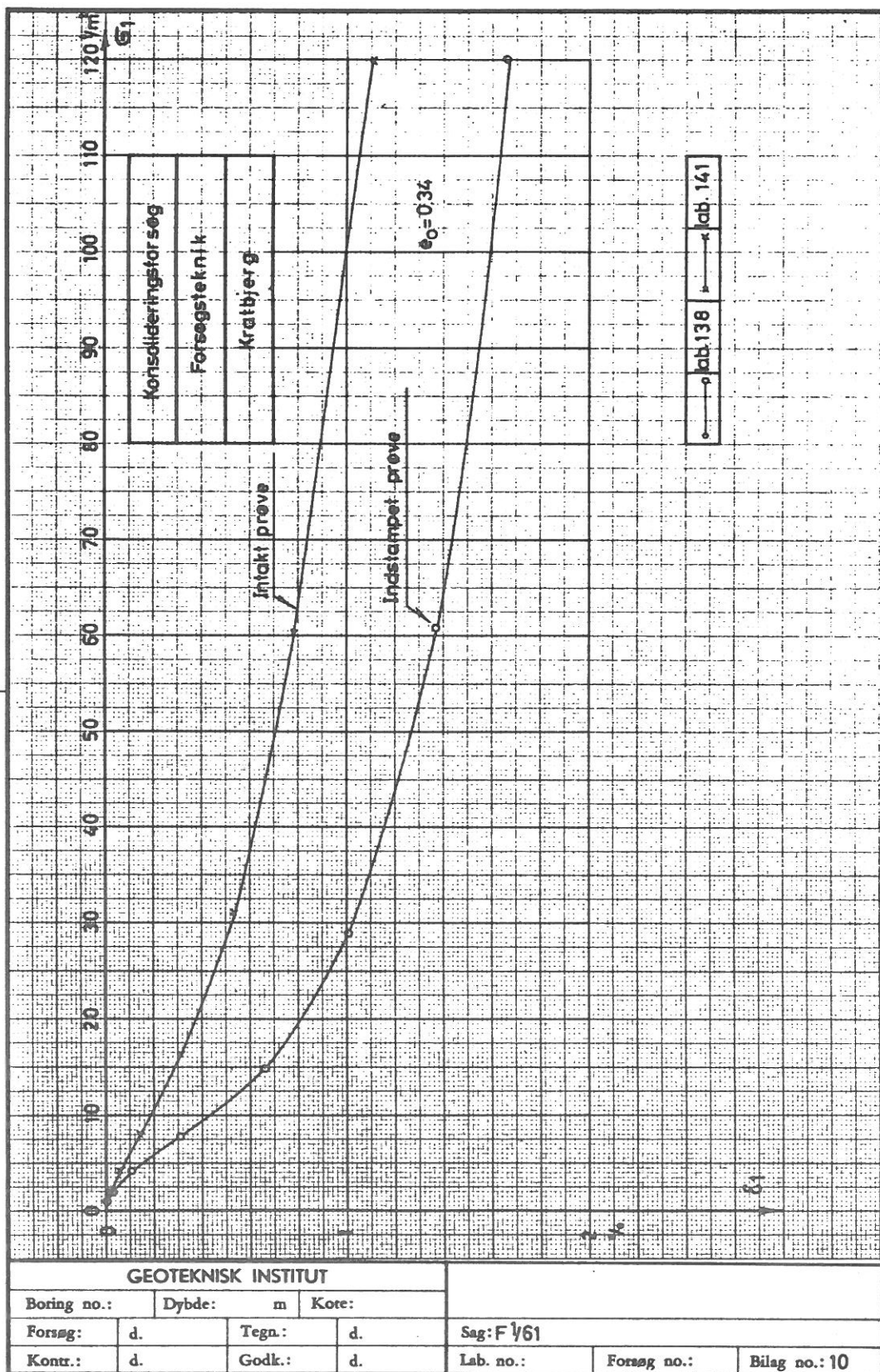
Kontr.: d. Godk.: d.

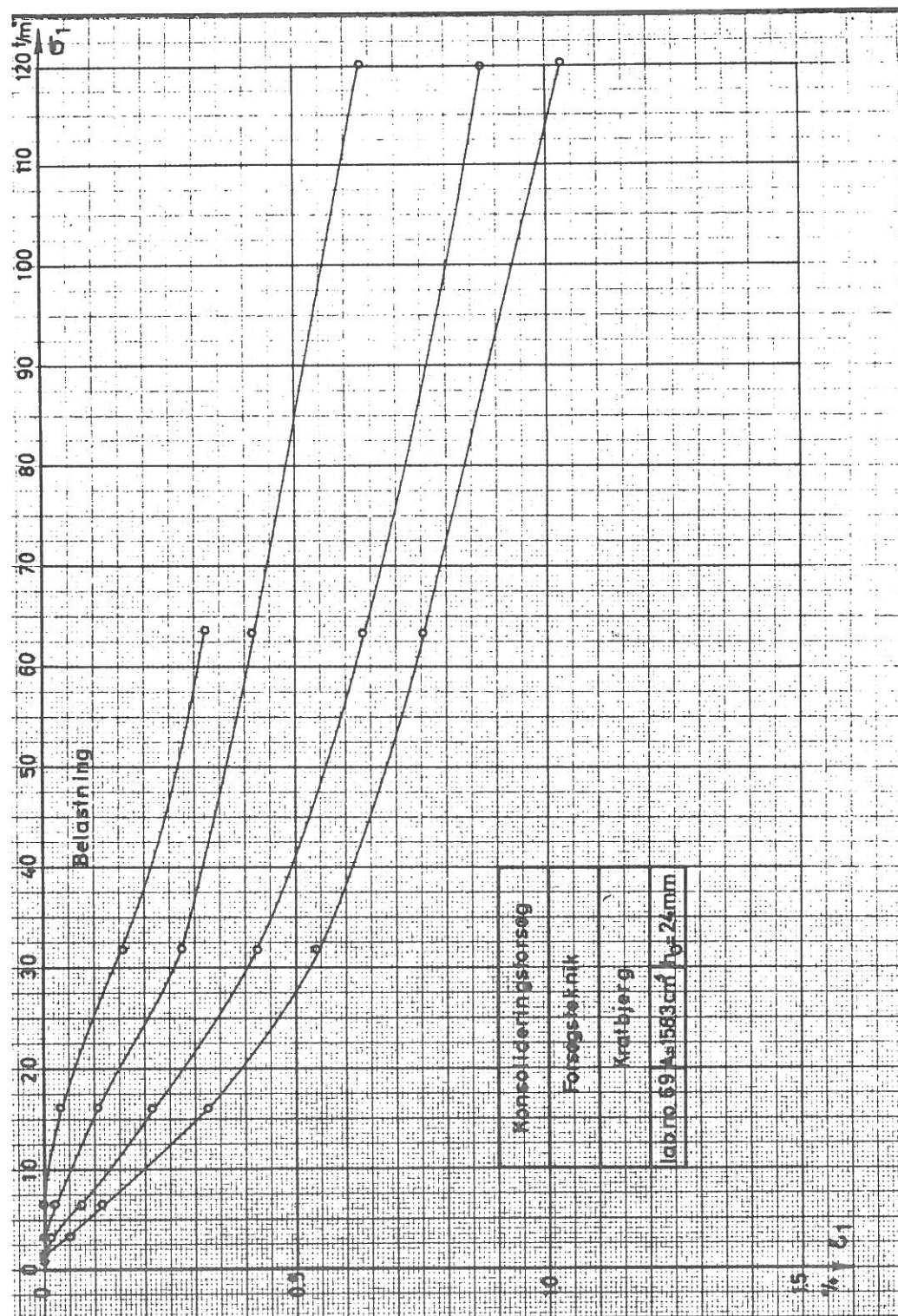
Sag: F¹/61

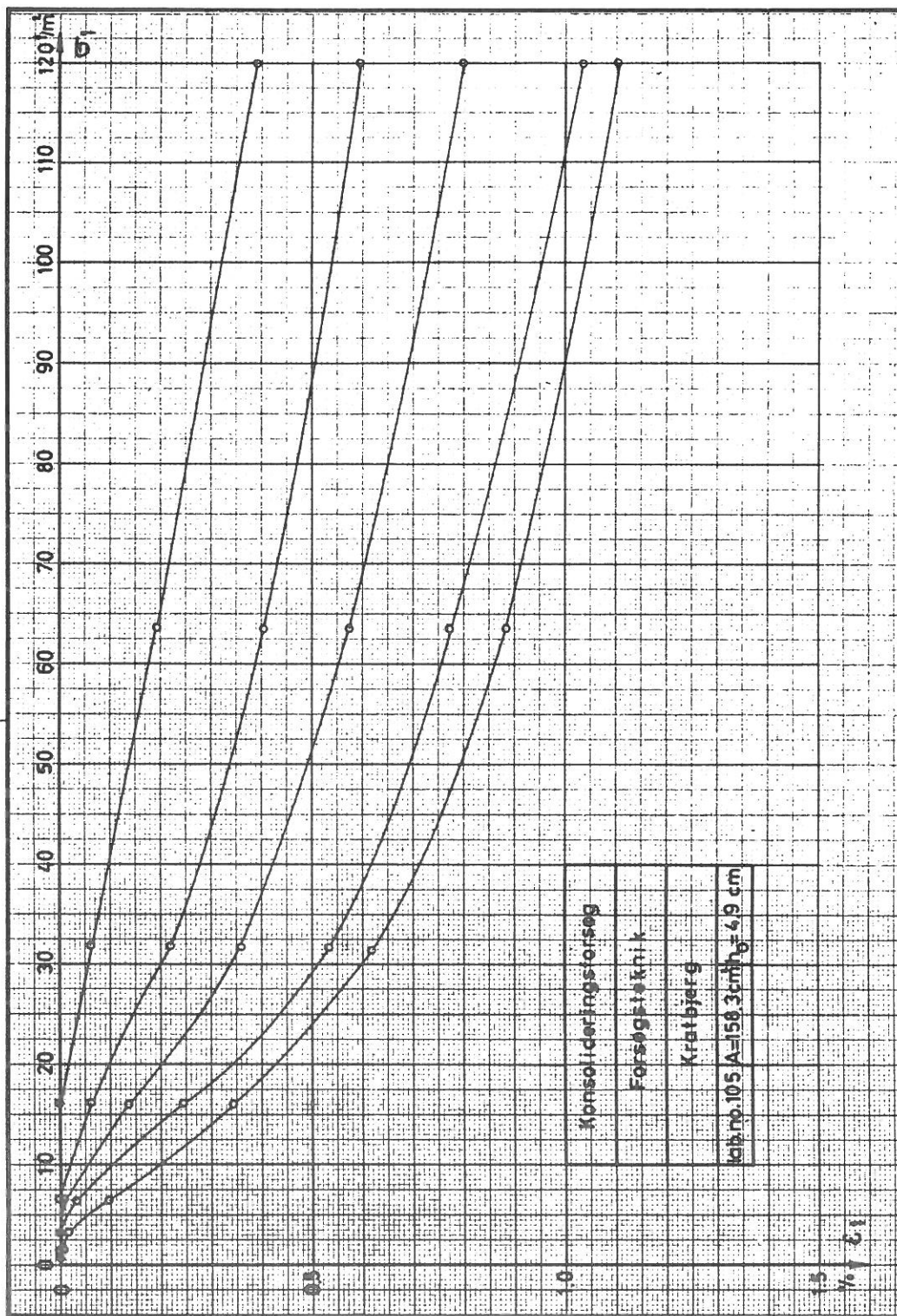
Lab. no.:

Forsøg no.:

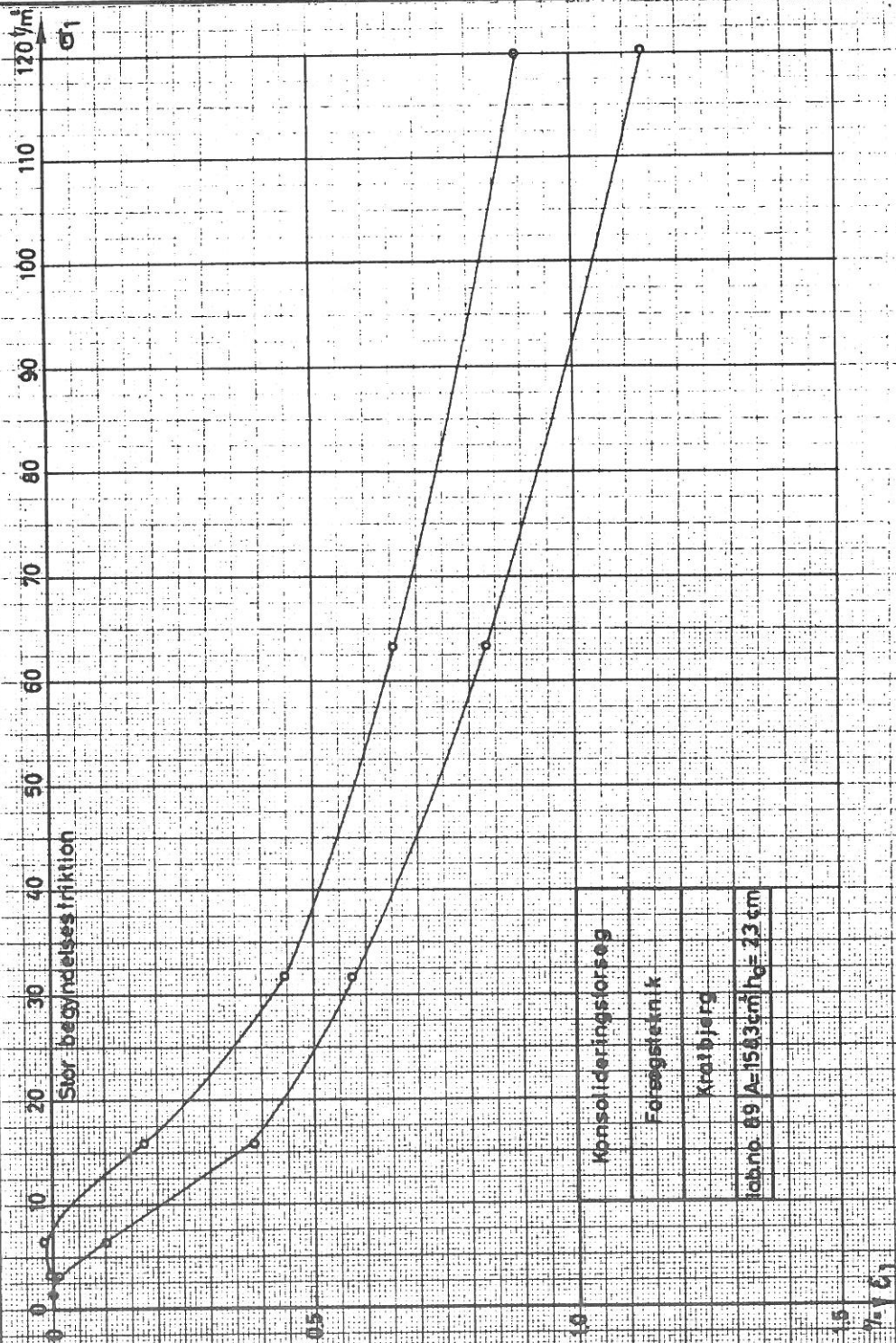
Bilag no.: 9



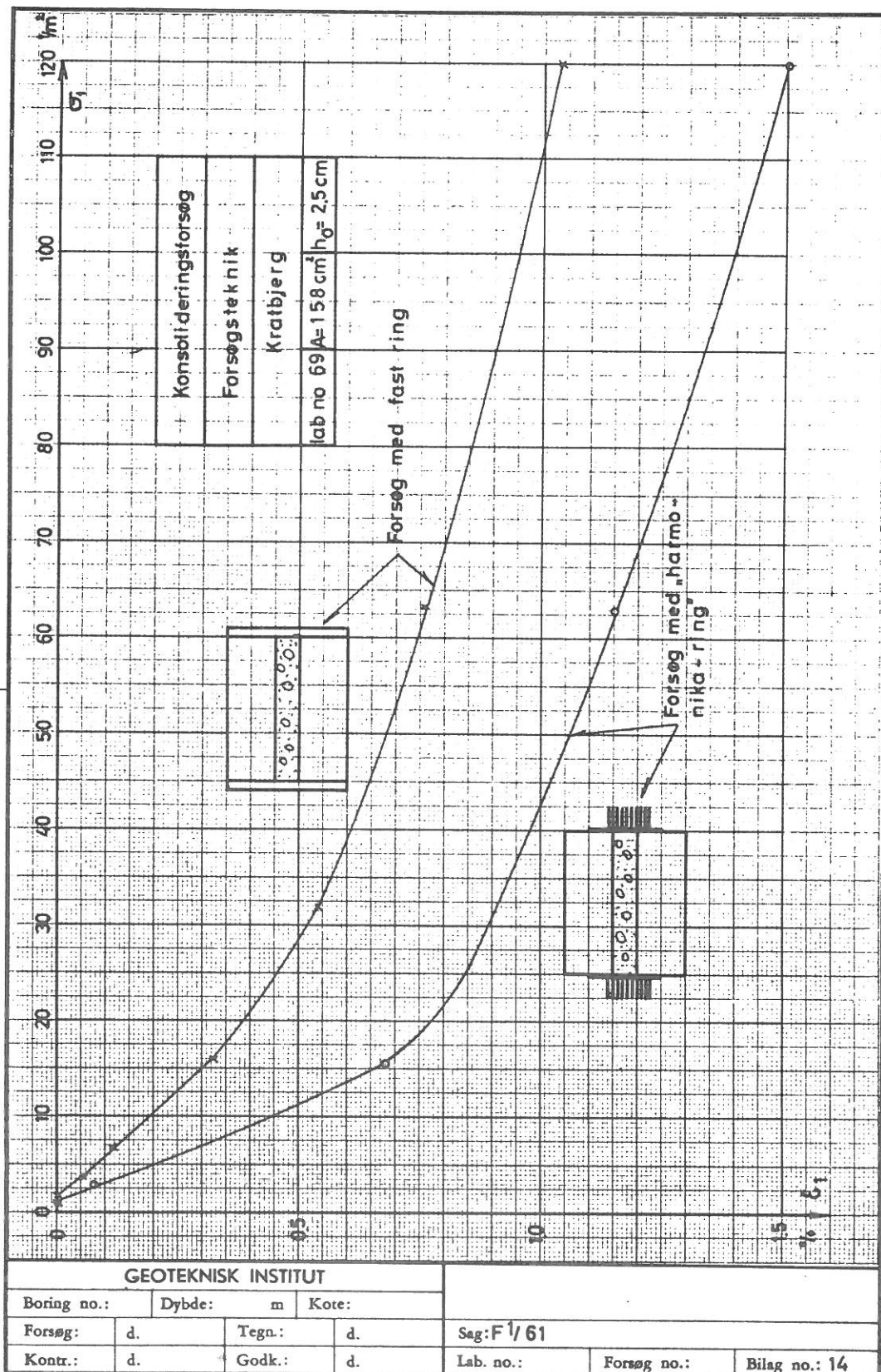




GEOTEKNISK INSTITUT					
Boring no.:	Dybde:	m	Kote:		
Forsøg:	d.	Tegn.:	d.	Sag: F 1/61	
Kontr.:	d.	Godk.:	d.	Lab. no.:	Forsøg no.:
				Bilag no.: 12	

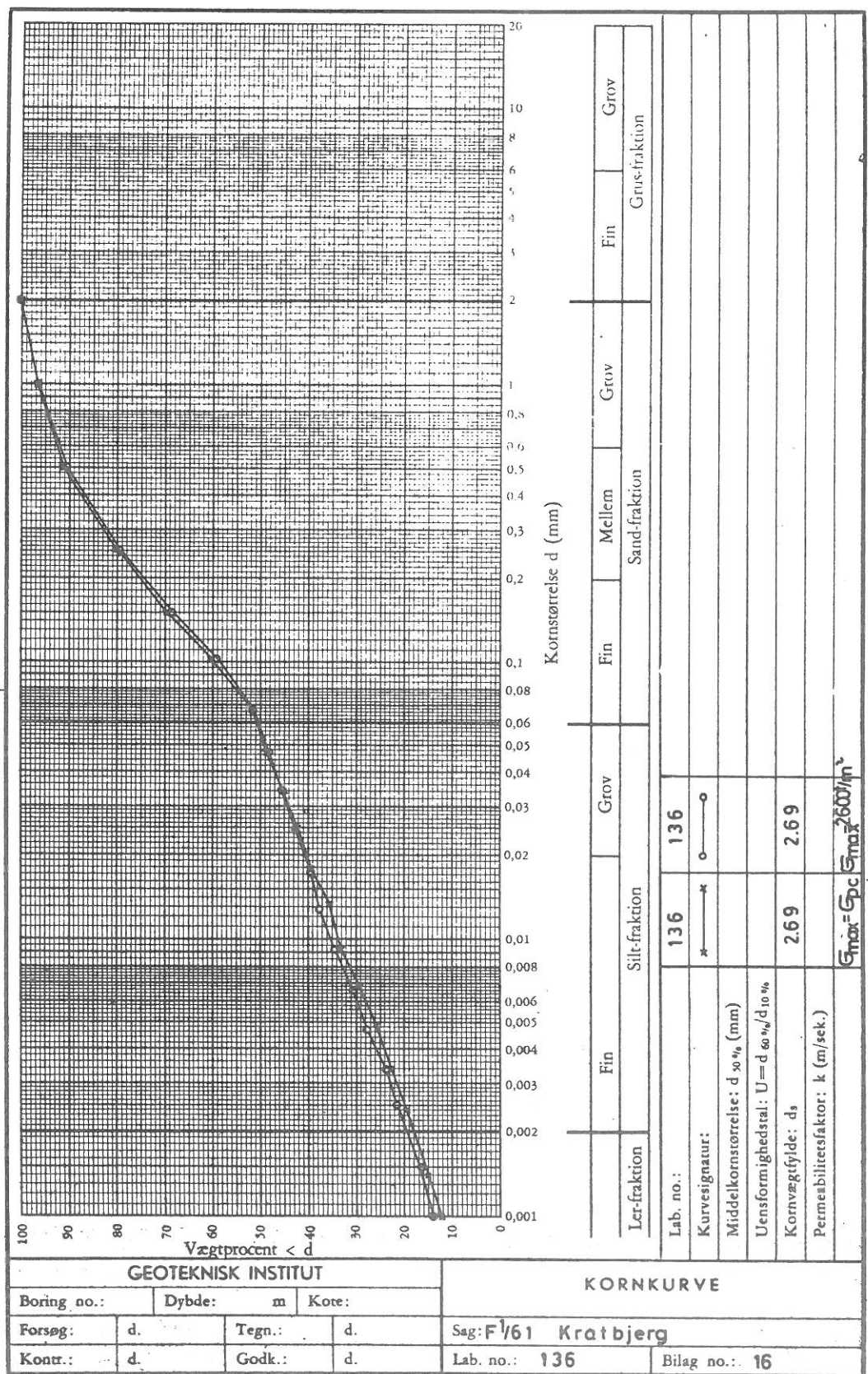


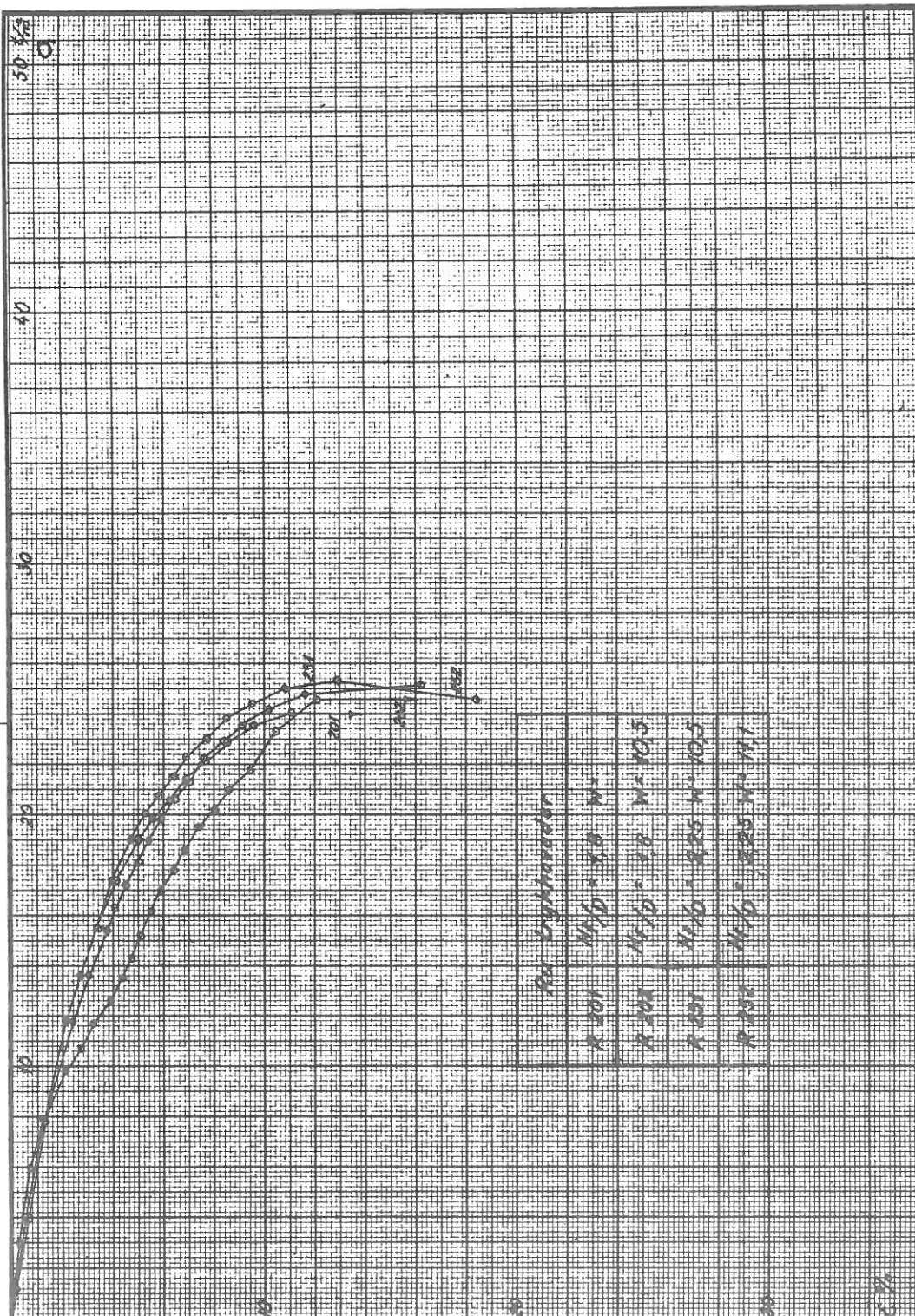
GEOTEKNISK INSTITUT					
Boring no.:	Dybde:	m	Kote:		
Forsøg:	d.	Tegn.:	d.	Sag: F1/61	
Kontr.:	d.	Godk.:	d.	Lab. no.:	Forsøg no.: Bilag no.: 13



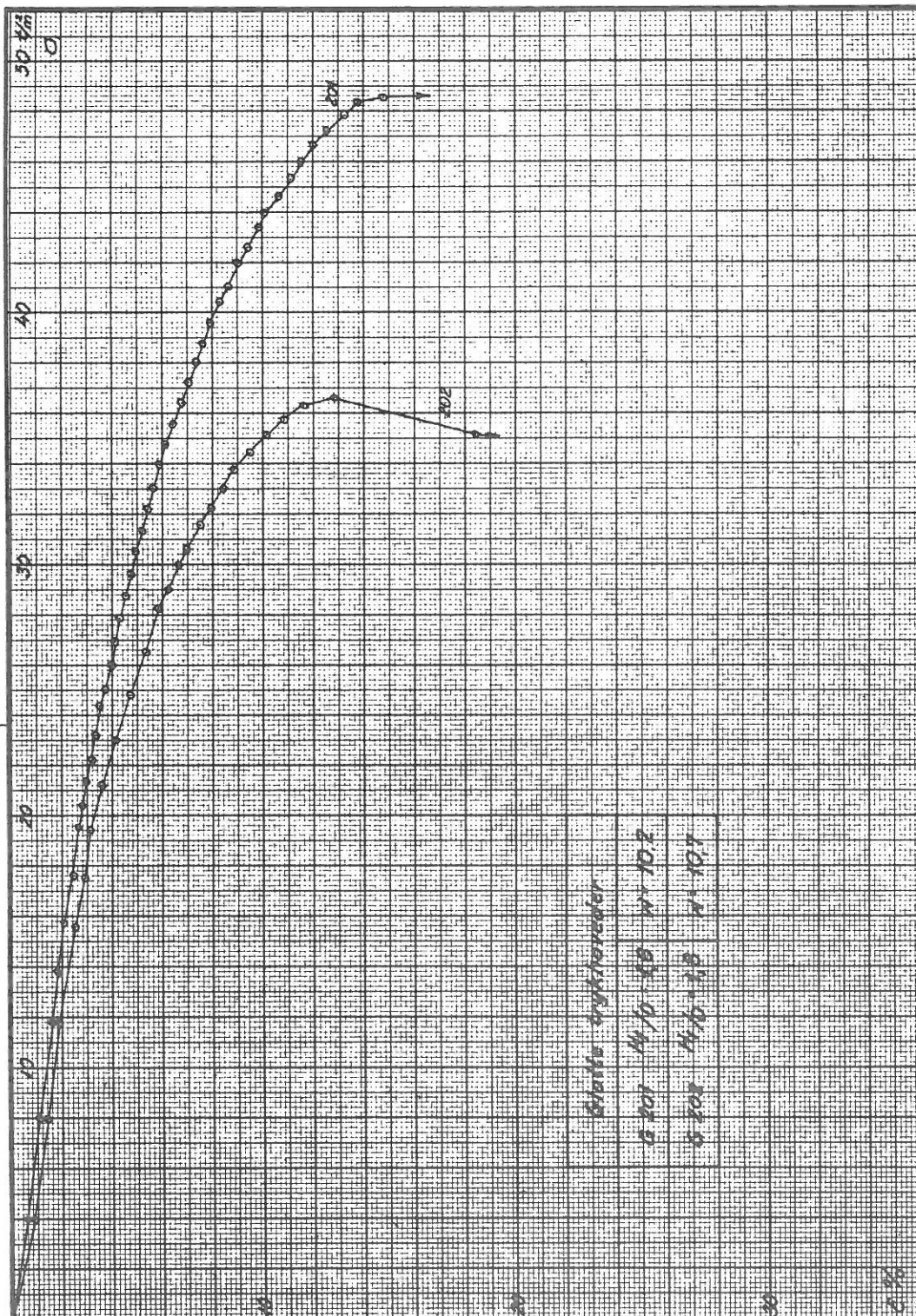
 $\sigma_{\max} = \sigma_{pc} \quad \sigma_{\max} \sim 3000 \text{ kg/cm}^2$

KORNKURVE
Carlsberg





GEOTEKNISK INSTITUT				Simple trykforsøg	
Boring no.:	Dybde:	m	Kote:		
Forsøg:	d.	Tegn.: H/m	d. 10-12-64	Sag:	F 1/61
Kontr.:	d.	Godk.:	d.	Lab. no.:	Forsøg no.: Bilag no.: 77

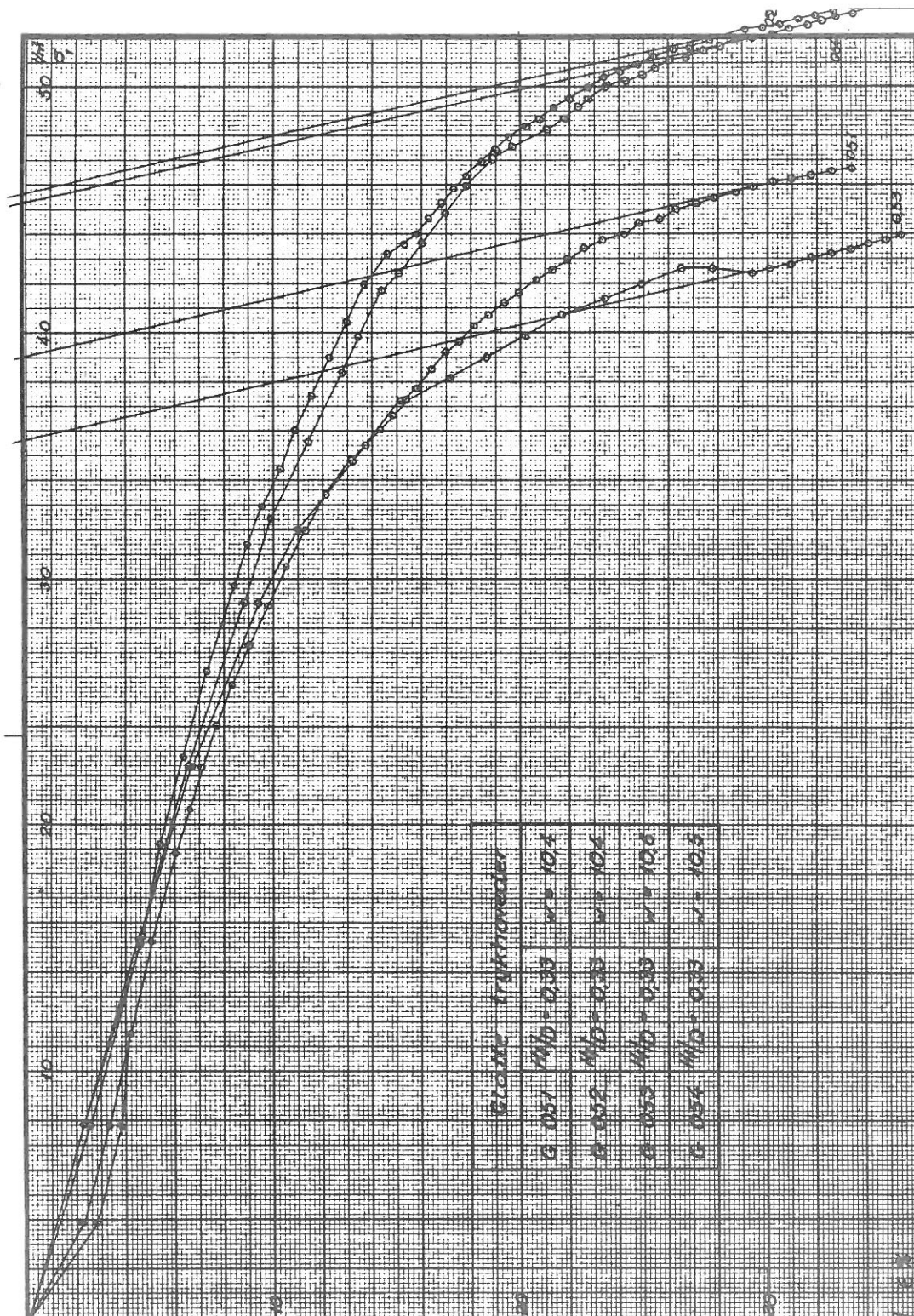


Blanke trykforsøder

0 202 H₁ 0-10 H₁ 10.2

0 202 H₁ 0-10 H₁ 10.7

GEOTEKNISK INSTITUT				Simple trykforsøg	
Boring no.:	Dybde:	m	Kote:	Sag: F1/61	
Forsøg:	d.	Tegn.: H/m.	d. 18-12-64		
Kontr.:	d.	Godk.:	d.	Lab. no.:	Forsøg no.:
				Bilag no.: 18	



Glatte trykknødder

G 051 $M_b = 0.33$ $w = 10.4$

G 052 $M_b = 0.33$ $w = 10.4$

G 053 $M_b = 0.33$ $w = 10.6$

G 054 $M_b = 0.33$ $w = 10.8$

GEOTEKNISK INSTITUT

Boring no.: Dybde: m Kote:

Forsøg: d. Tegn: H/m d. 18-12-64

Kontr.: d. Godk.: d.

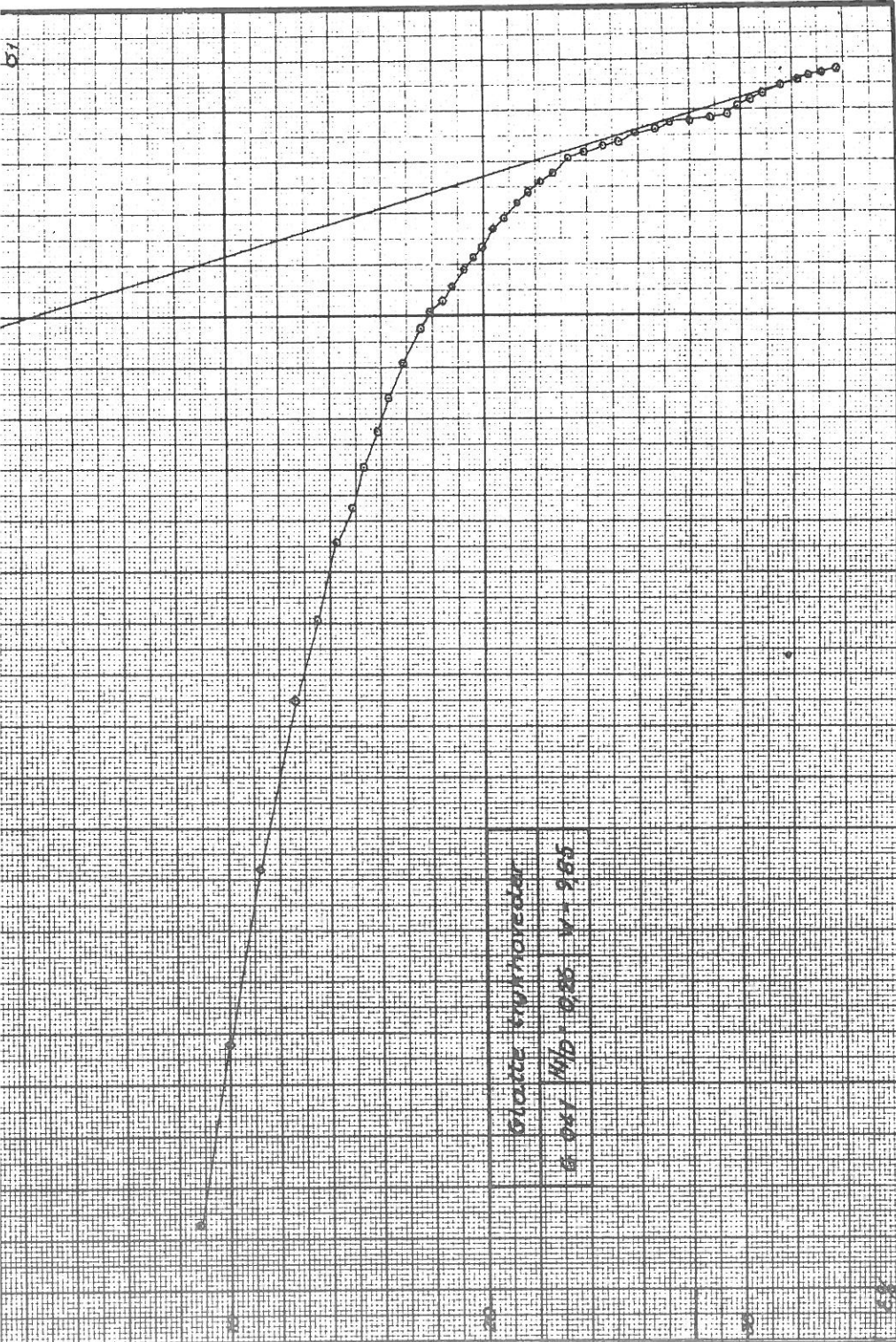
Simple trykforsøg

Sag: F1/61

Lab. no.:

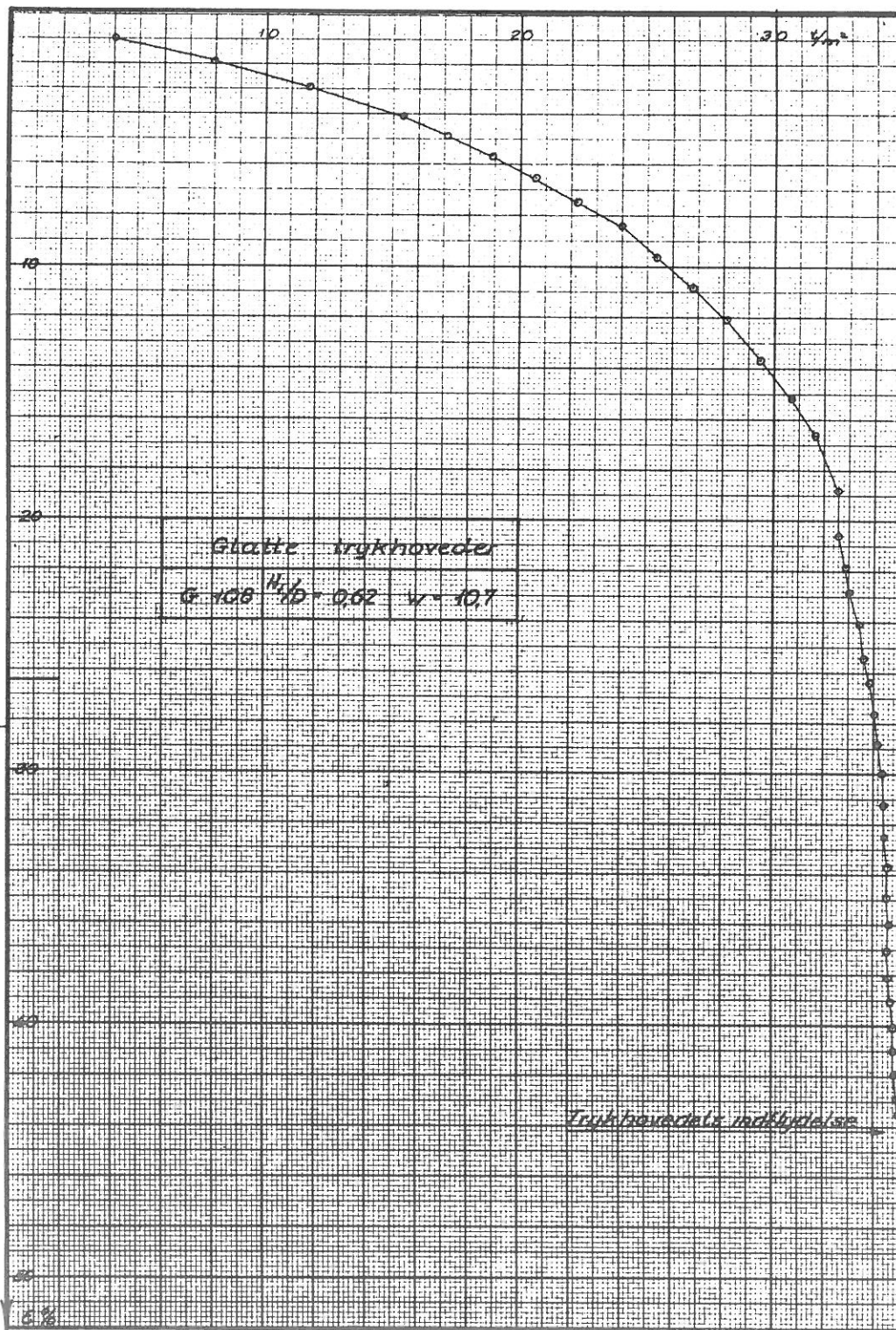
Forsøg no.:

Bilag no.: 20



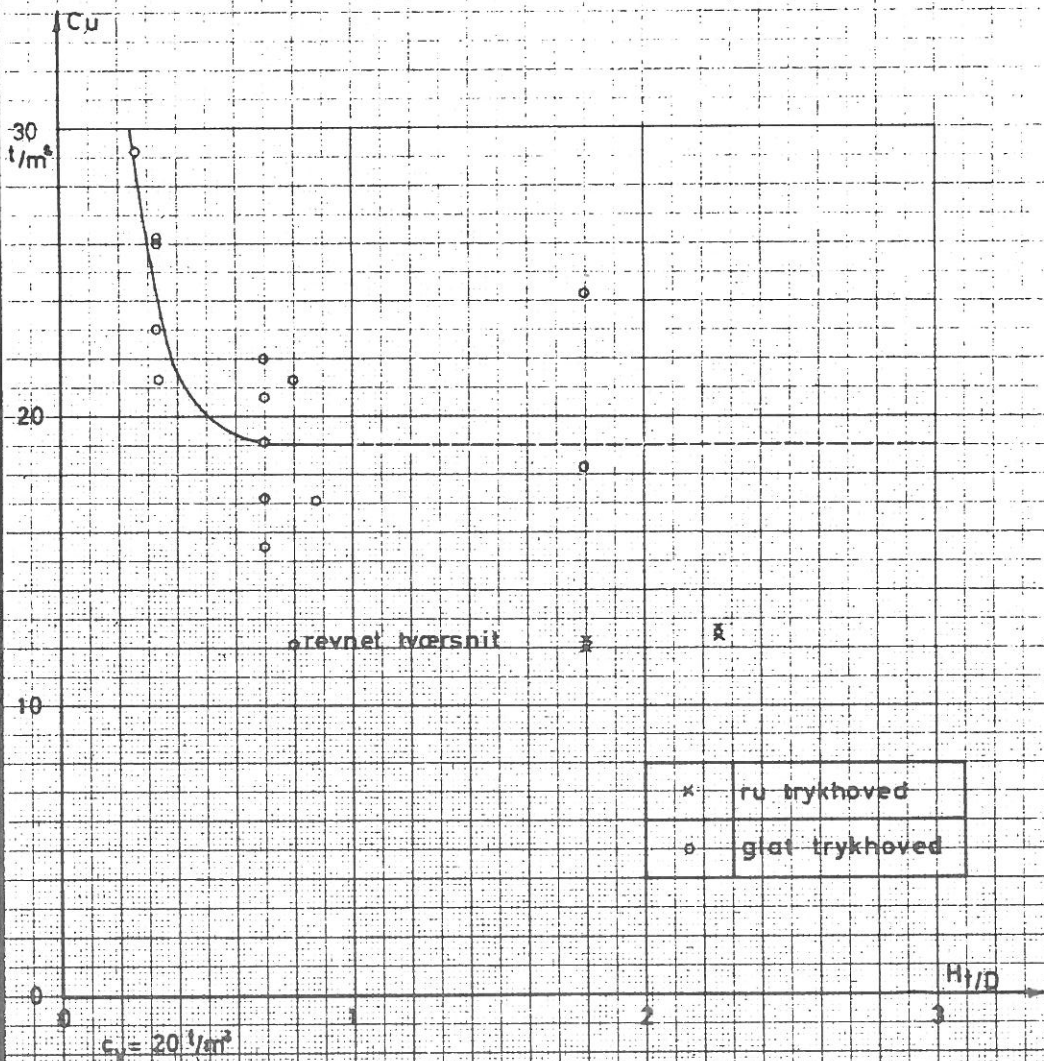
Statte trykthorsted
 100 x 100 x 100
 100 x 100 x 100

GEOTEKNISK INSTITUT				Simple trykforsøg		
Forsøg no.:	Dybde:	m	Kore:			
Forsøg:	d.	Tegn.: RS	d. 5-1-65	Sag: F1/61		
Contr.:	d.	Godk.:	d.	Lab. no.:	Forsøg no.:	Bilag no.: 21



GEOTEKNISK INSTITUT					Simple trykforsøg	
Boring no.:	Dybde:	m	Kote:			
Forsøg:	d.	Tegn.: RS	d. 6-1-65	Sag: F1/61		
Kontroll.: d.	Godk.: d.			Lab. no.:	Forsøg no.:	Bilag no.: 22

Simple trykforsøg med prøveareal 10 t/m²



GEOTEKNISK INSTITUT

Kratbjerg moræneler

Boring no.: Dybde: m Kote:

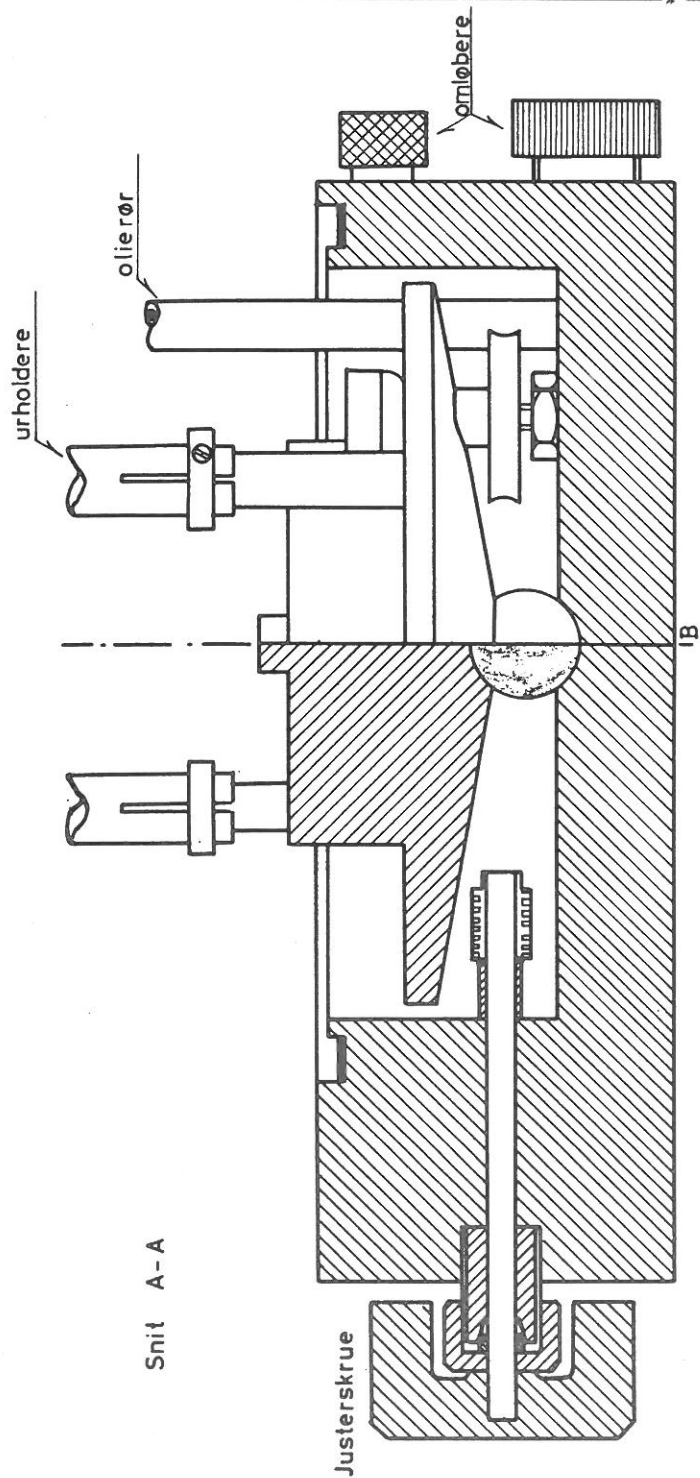
Forsøg: d. Tegn.: d.

Kontr.: d. Godk.: d.

Sag: F 1/61

Lab. no.: Forsøg no.: Bilag no.: 23

Det nye triaxialapparat
Underplade
1:1

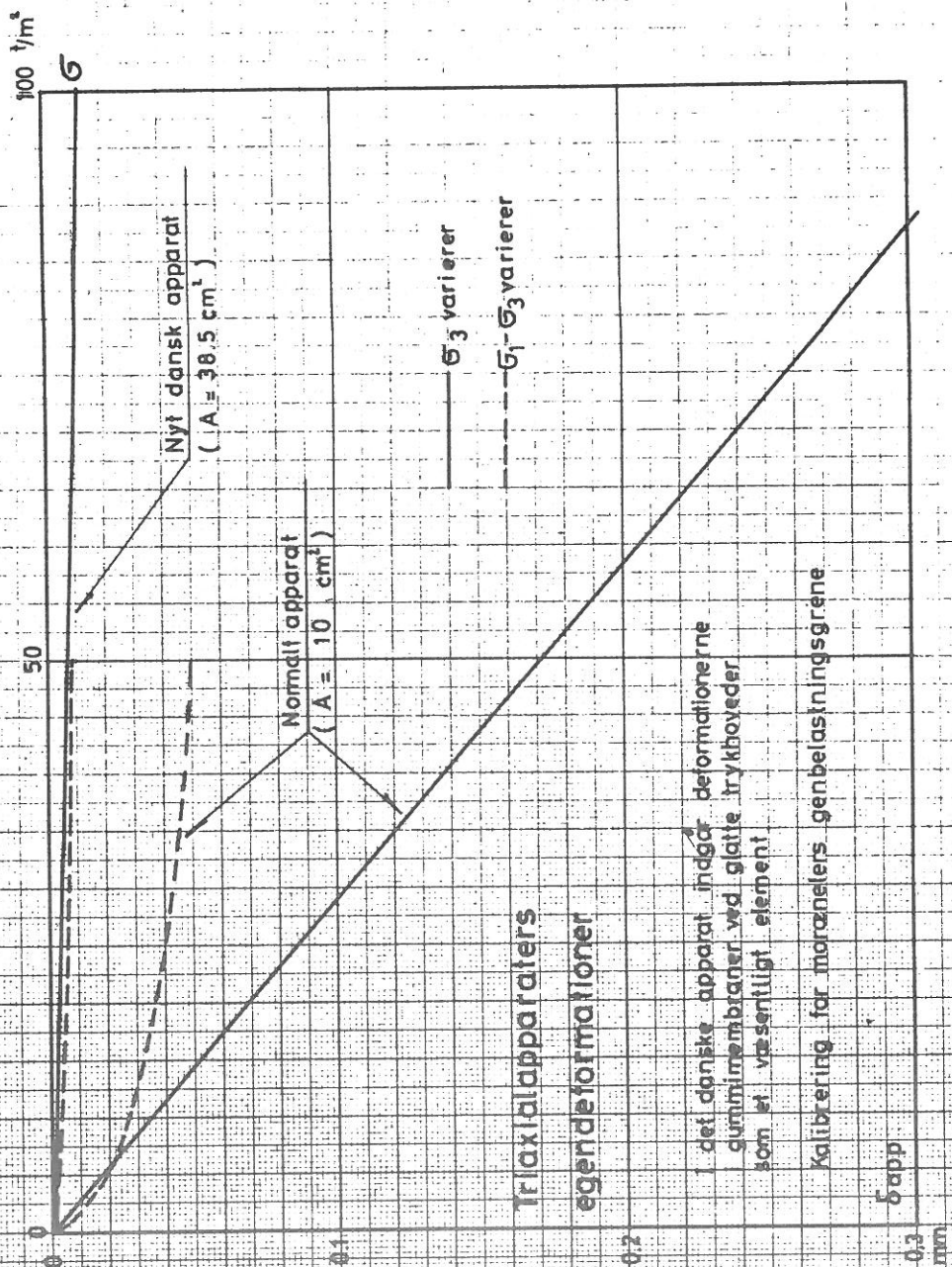


GEOTEKNISK INSTITUT

Boring no.: Dybde: m Kote:

Forsøg: d. Tegn.: d. Sag:

Kontz.: d. Godk.: d. Lab. no.: Forsøg no.: Bilag no.: 24



GEOTEKNISK INSTITUT

Boring no.: Dybde: m Kote:

Forsøg: d. Tegn.: d.

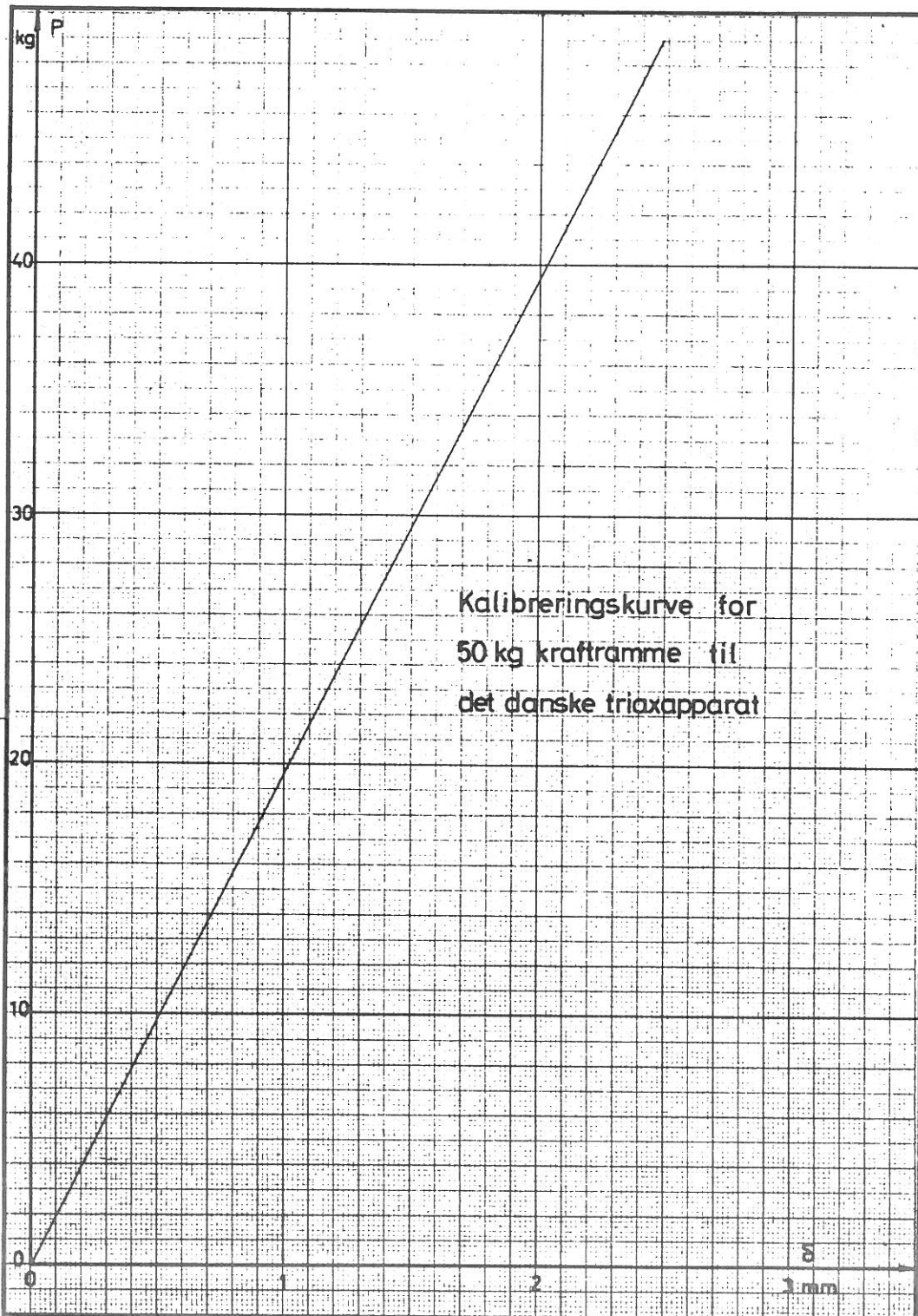
Kontr.: d. Godk.: d.

Sag: F¹/61

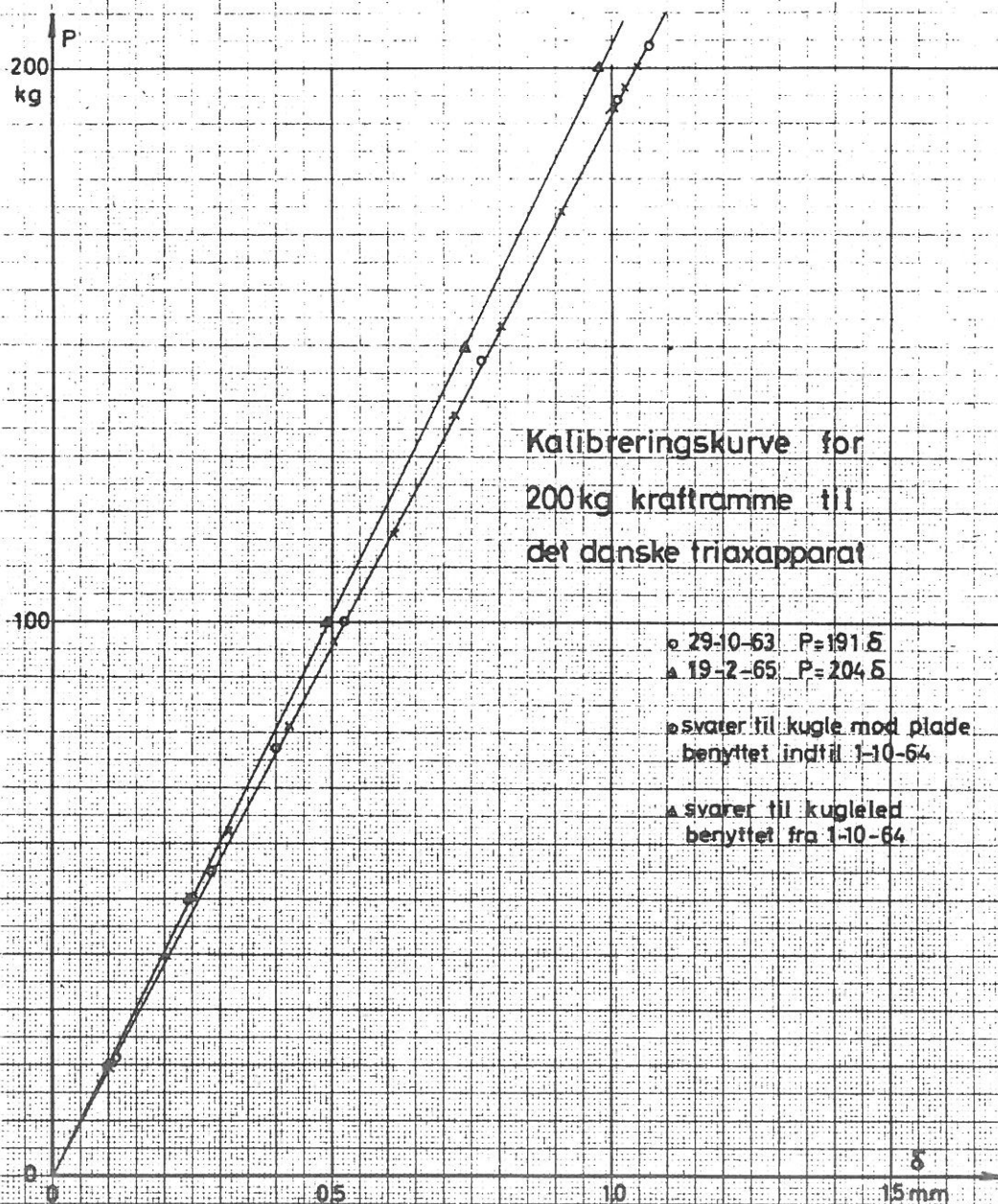
Lab. no.:

Forsøg no.:

Bilag no.: 25



GEOTEKNISK INSTITUT					
Boring no.:	Dybde:	m	Kote:		
Forsøg:	d.	Tegn.:	d.	Sag:	
Kontr.:	d.	Godk.:	d.	Lab. no.:	Bilag no.: 26



GEOTEKNISK INSTITUT

Boring no.: Dybde: m Kote:

Forsøg: d. Tegn.: d.

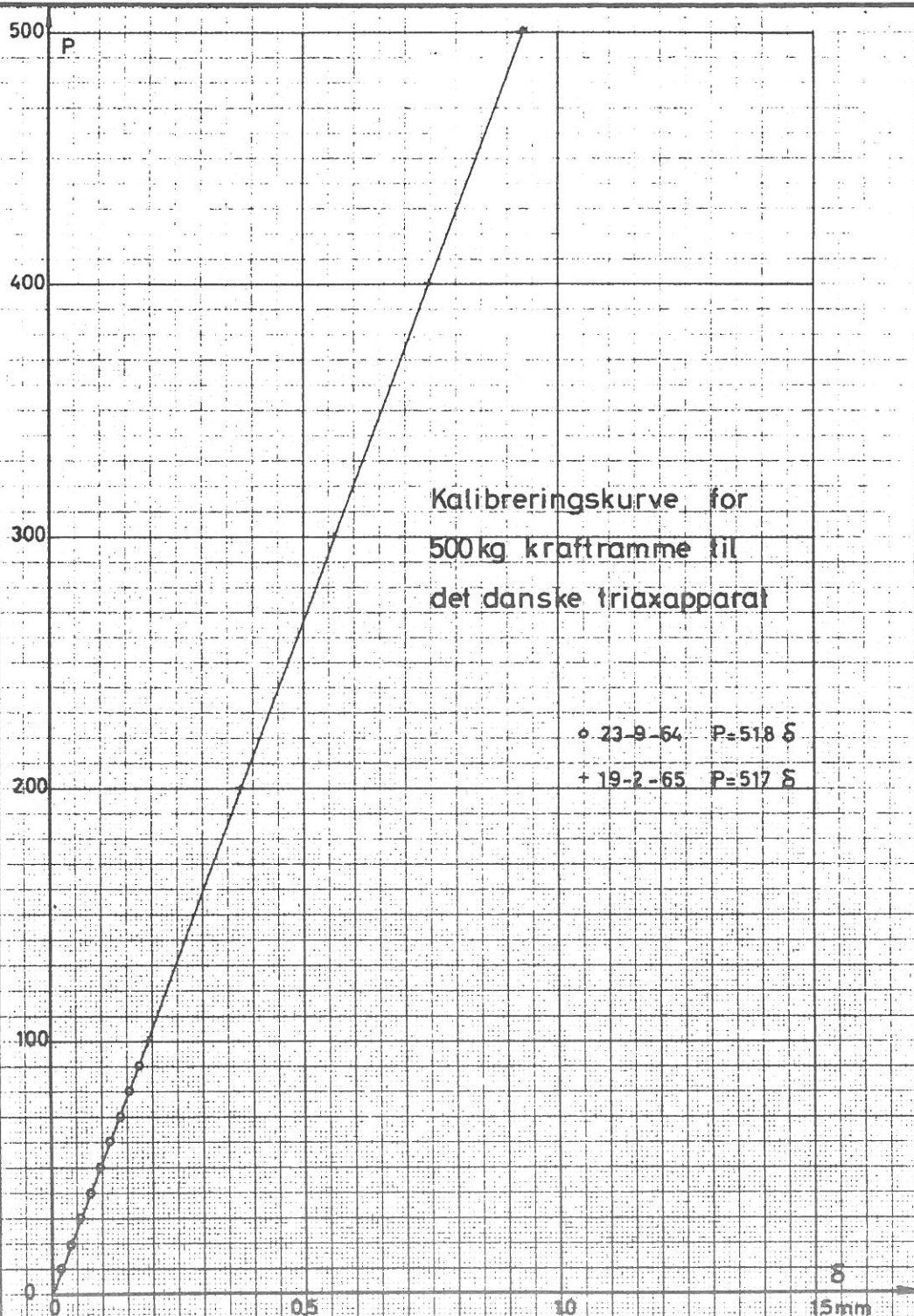
Kontr.: d. Godk.: d.

Sag:

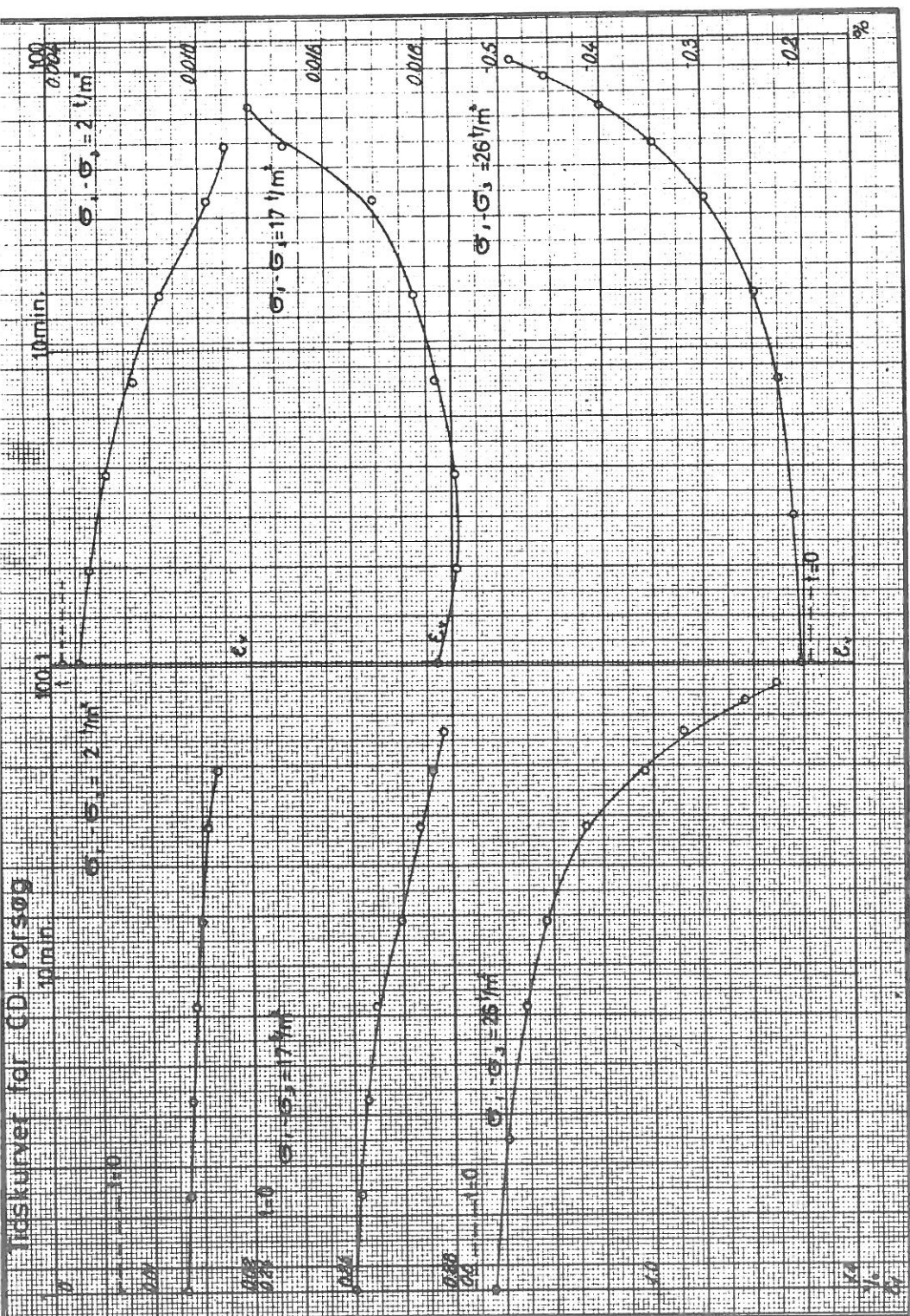
Lab. no.:

Forsøg no.:

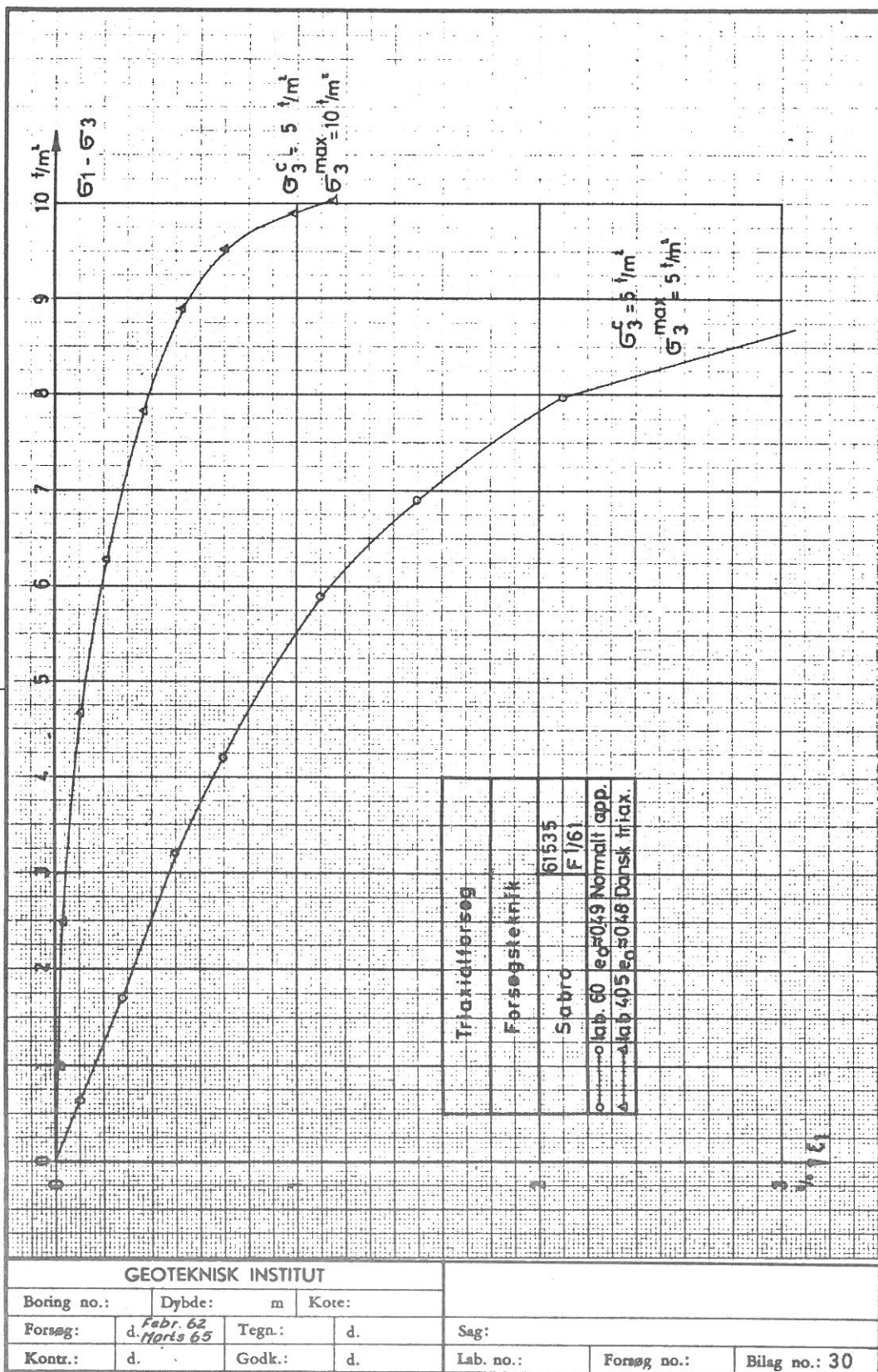
Bilag no.: 27

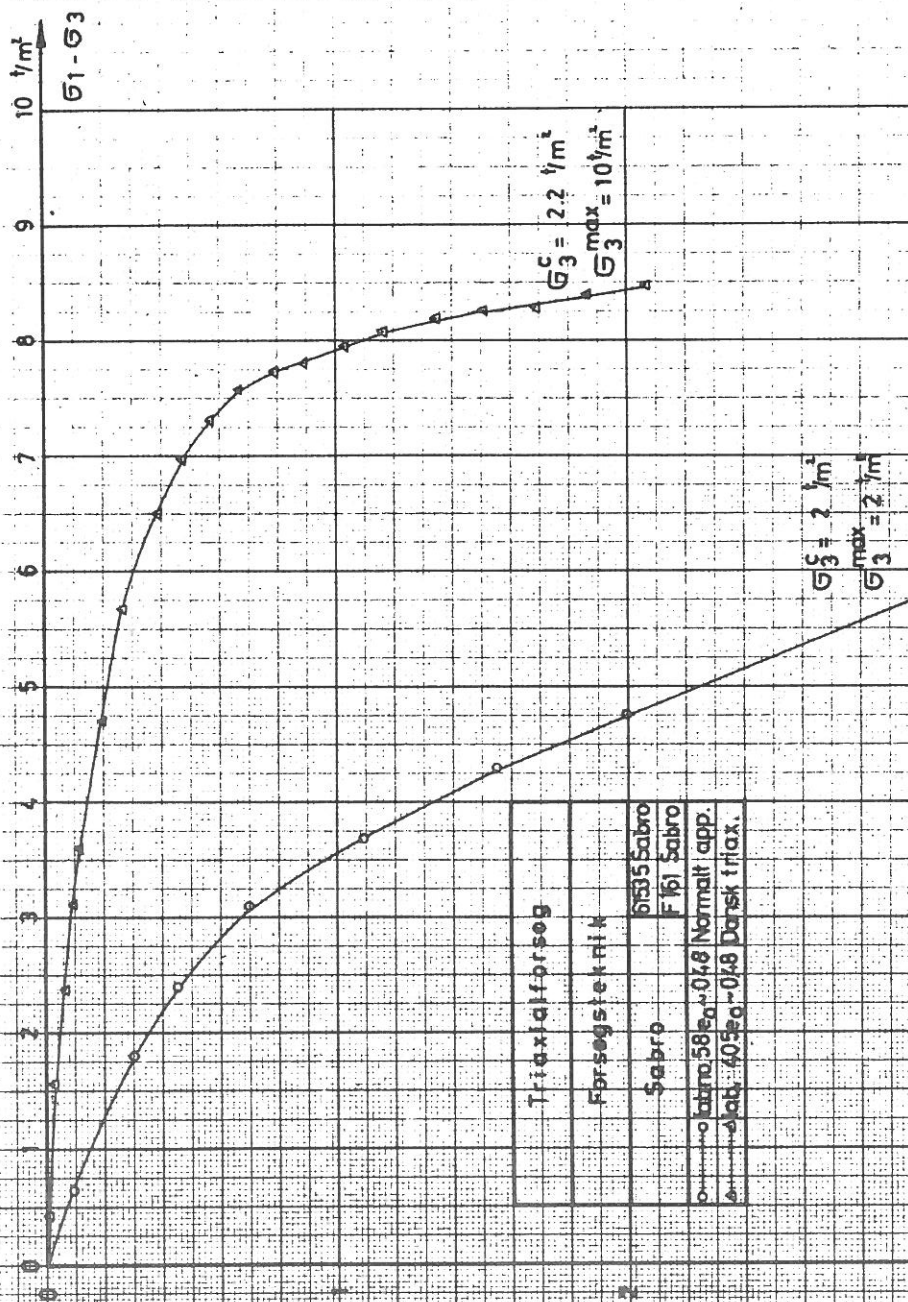


GEOTEKNISK INSTITUT					
Boring no.:	Dybde:	m	Kote:		
Forsøg:	d.	Tegn.:	d.	Sag:	
Kontr.:	d.	Godk.:	d.	Lab. no.:	Forsøg no.: Bilag no.: 28



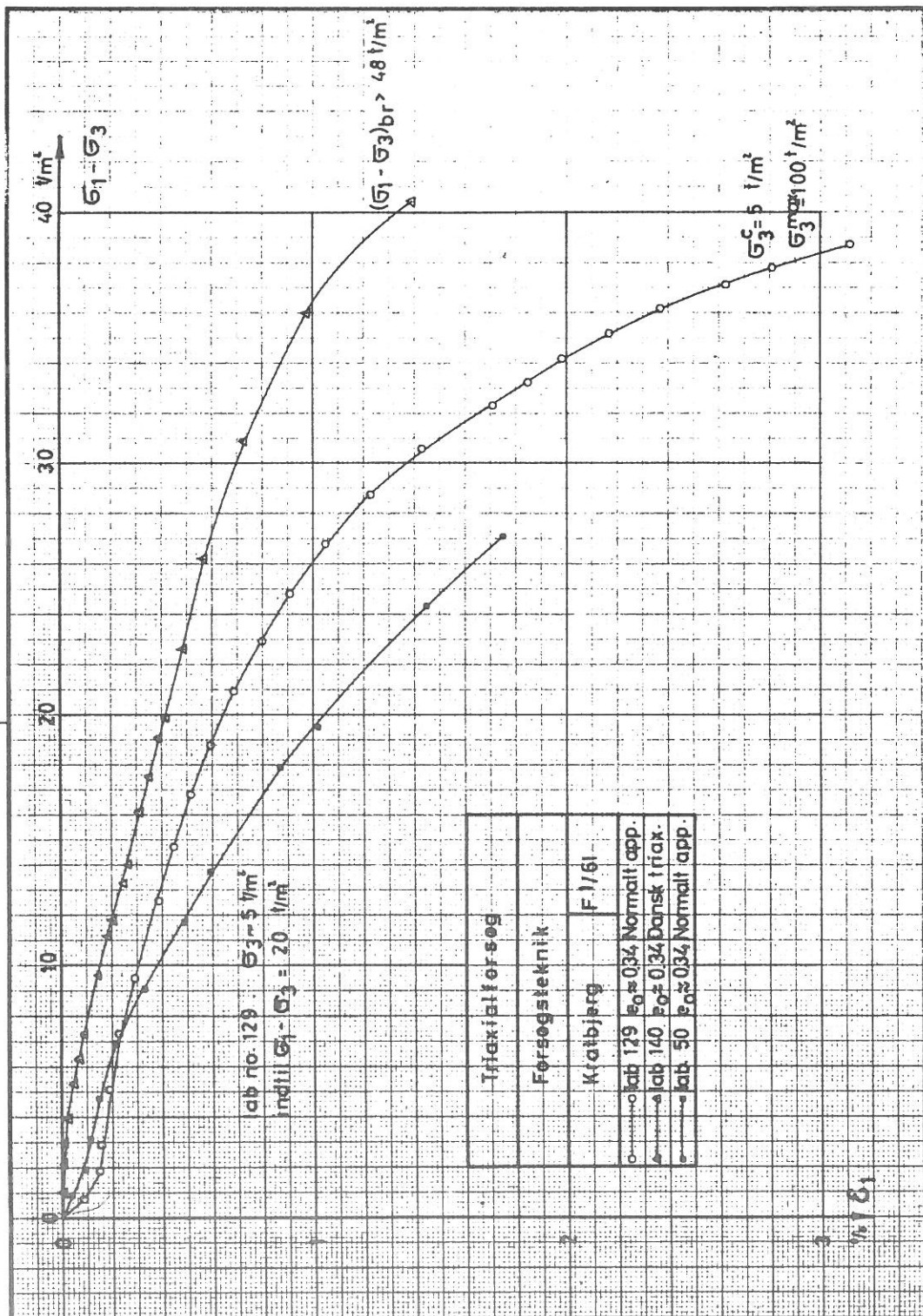
GEOTEKNISK INSTITUT					
Boring no.:		Dybde: m		Kote:	
Forsøg:	d.	Tegn:	d.	Sag:	
Kontr.:	d.	Godk.:	d.	Lab. no.:	Forsøg no.:
				Bilag no.: 29	





Triaxialforsøg
Forsøgstechnik
Såbro
6535 Såbro
F 161 Såbro
0.58 en. 0.48 Normalt app.
0.40 lab. 405 en. 0.48 Dansk triax.

GEOTEKNISK INSTITUT						
Boring no.:	Dybde:	m	Kote:			
Forsøg:	d. Febr. 62	Tegn.:	d.	Sag:		
Kontr.:	d. Høst 65	Godk.:	d.	Lab. no.:	Forsøg no.:	Bilag no.: 31



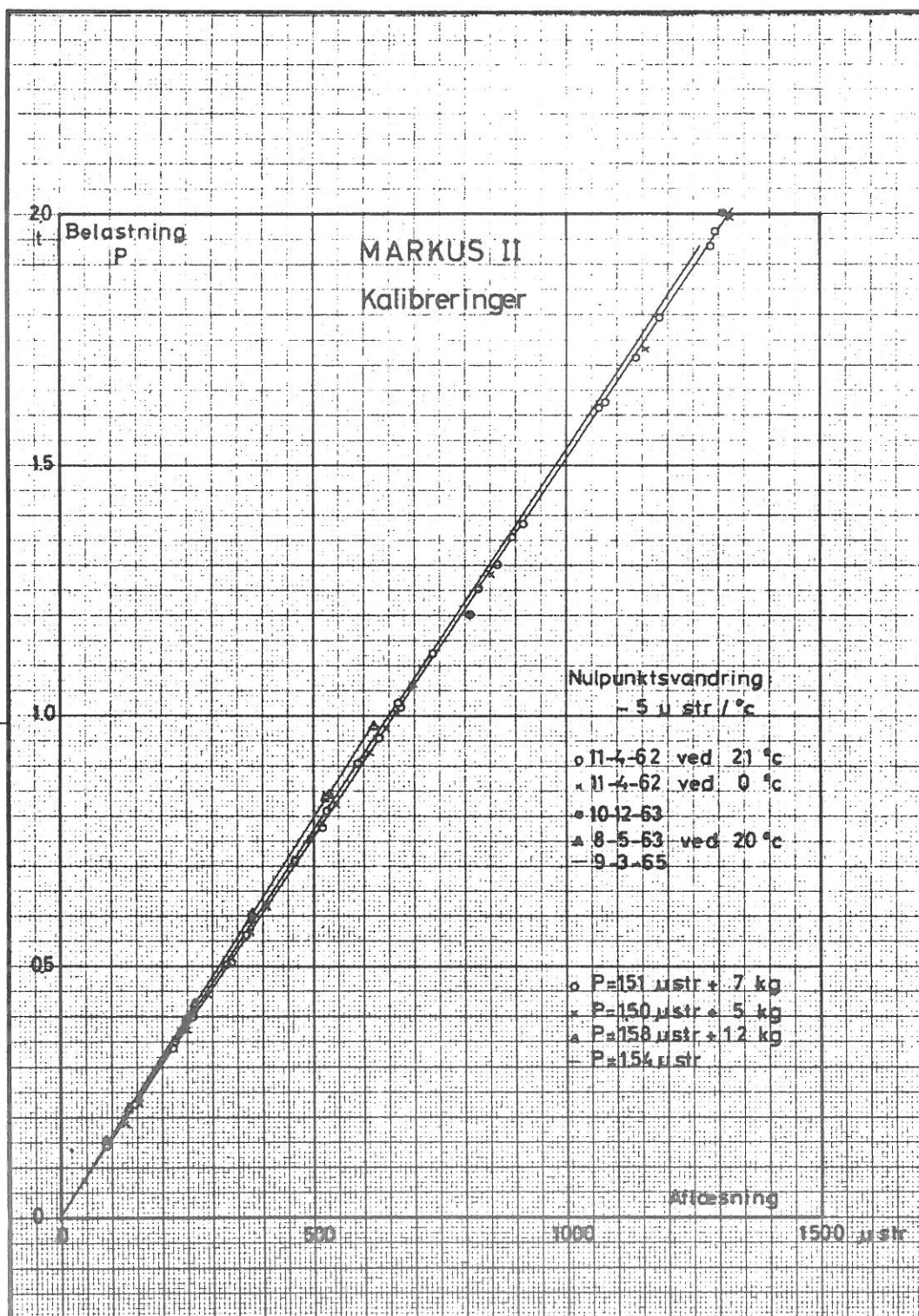
GEOTEKNISK INSTITUT					
Boring no.:	Dybde:	m	Kote:		
Forsøg:	Noj 84 d. Sept. 64	Tegn.:	d.	Sag:	
Kontr.:	d.	Godk.:	d.	Lab. no.:	Forsøg no.:
				Bilag no.: 32	

CD-forsøg med σ_1 konstant. Dansk triaxialapparat

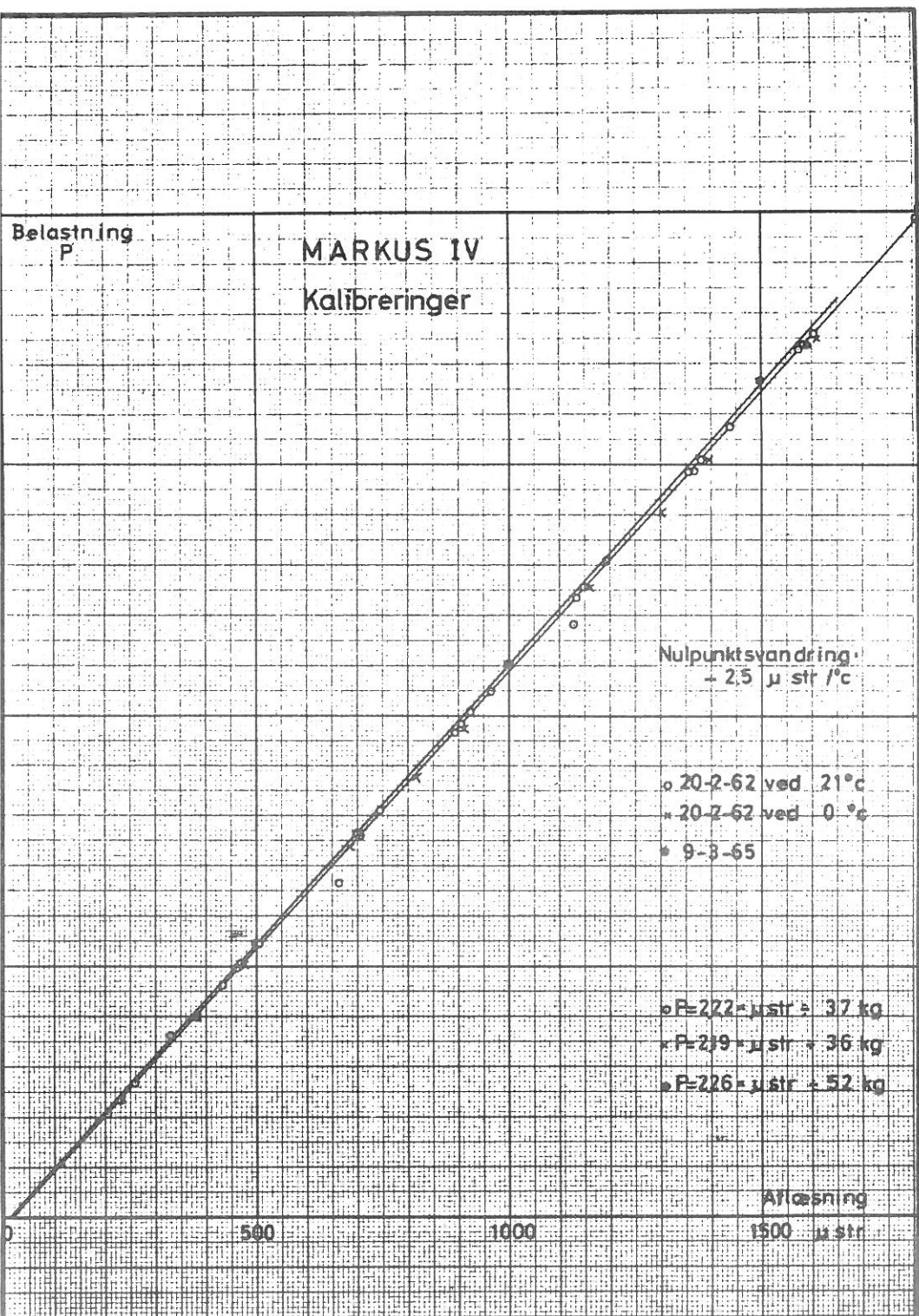


GEOTEKNISK INSTITUT

Boring no.:	Dybde:	m	Kote:			
Forsøg:	d.	Tegn.:	d.	Sag:		
Kontr.:	d.	Godk.:	d.	Lab. no.:	Forsøg no.:	Bilag no.: 33



GEOTEKNISK INSTITUT					
Boring no.:	Dybde: m		Kote:		
Forsøg:	d.	Tegn.:	d.	Sag:	
Kontr.:	d.	Godk.:	d.	Lab. no.:	Forsøg no.: Bilag no.: 34



GEOTEKNISK INSTITUT

Boring no.: Dybde: m Kore:

Forsøg: d. Tegn: d.

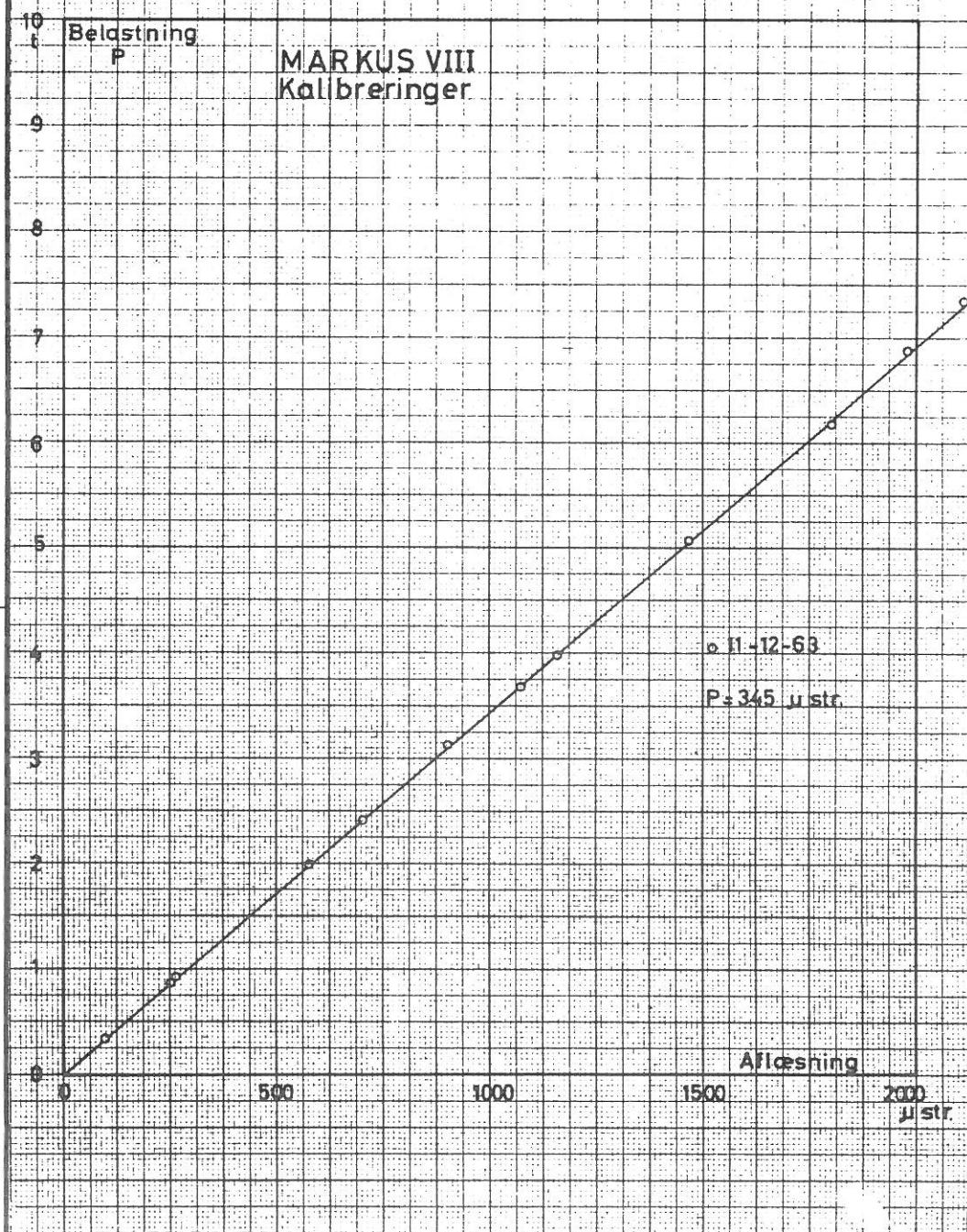
Kontr.: d. Godk.: d.

Sag:

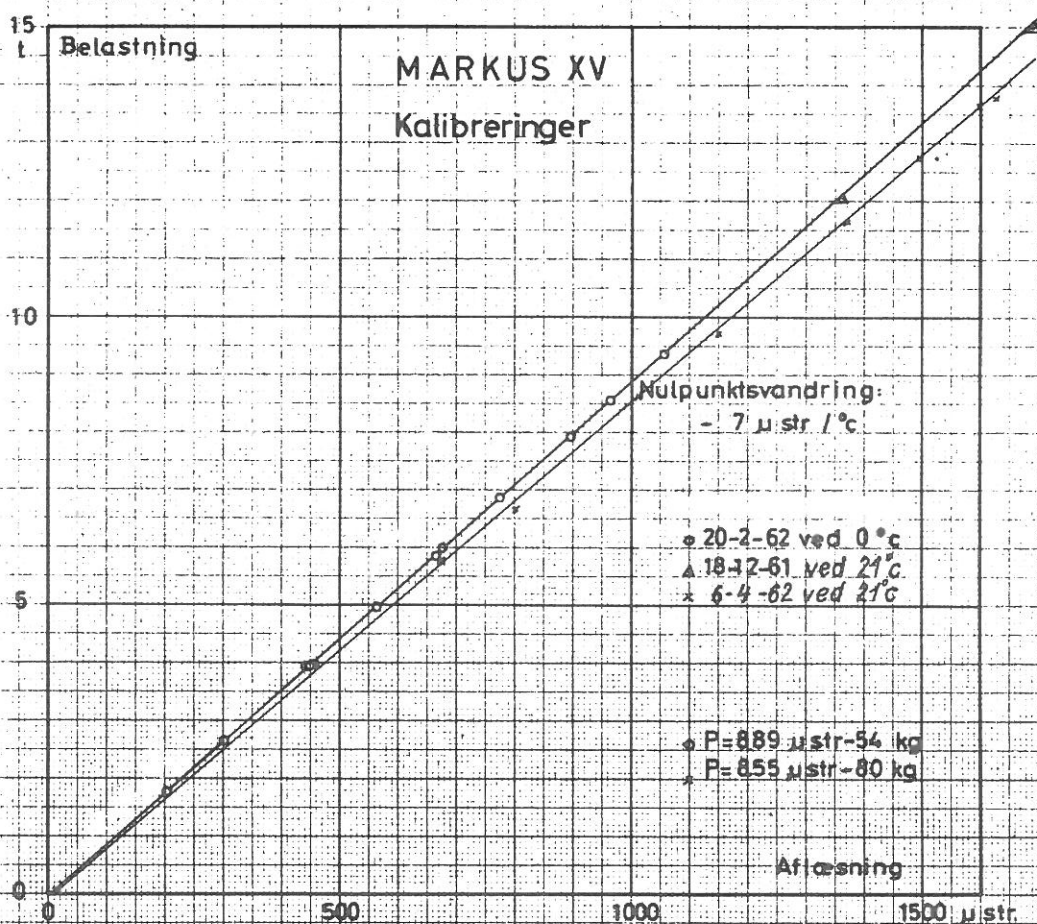
Lab. no.:

Forsøg no.:

Bilag no.: 35



GEOTEKNISK INSTITUT					
Boring no.:	Dybde:	m	Kote:		
Forsøg:	d.	Tegn:	d.	Sag:	
Kontr.:	d.	Godk.:	d.	Lab. no.:	Forsøg no.:
				Bilag no.: 36	



GEOTEKNISK INSTITUT

Boring no.: Dybde: m Kote:

Forsøg: d. Tegn.: d.

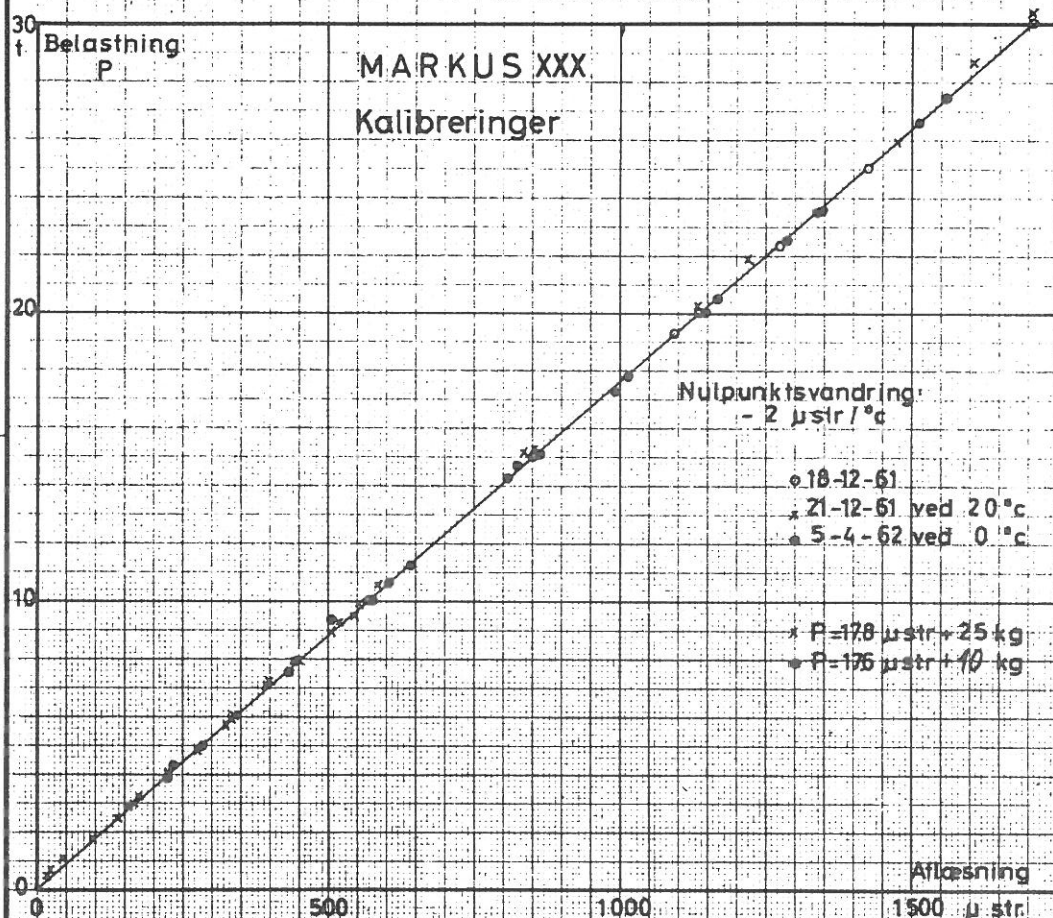
Kontr.: d. Godk.: d.

Sag:

Lab. no.:

Forsøg no.:

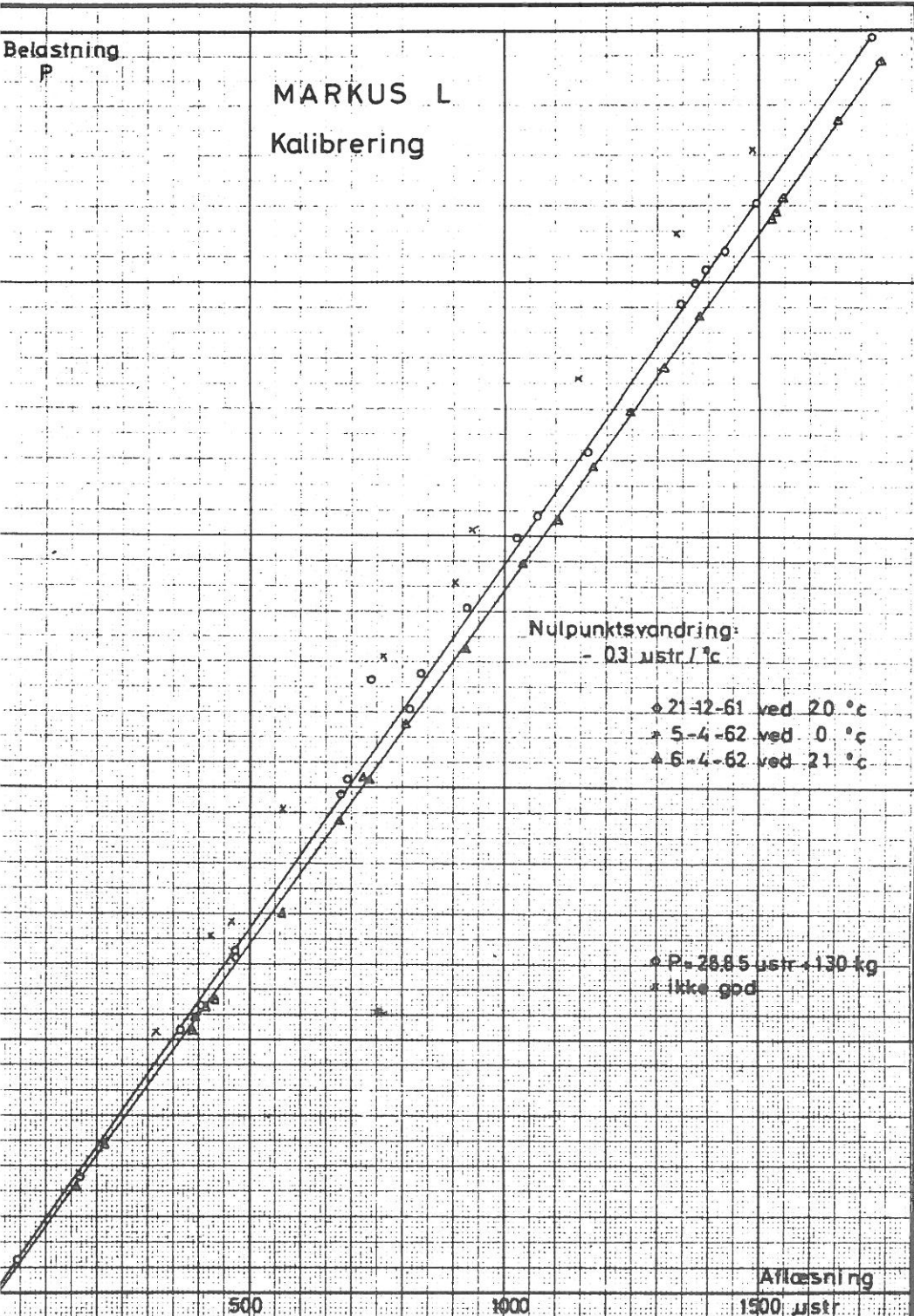
Bilag no.: 37



GEOTEKNISK INSTITUT			
Boring no.:	Dybde:	m	Kote:
Forsøg:	d.	Tegn.:	d.
Kontr.:	d.	Godk.:	d.
Sag:		Lab. no.:	Forsøg no.:
		Bilag no.: 38	

Belastning
P

MARKUS L
Kalibrering



Nulpunktsændring:
- 0.3 µstr / °C

- 21-12-61 ved 20 °C
- 5-4-62 ved 0 °C
- 6-4-62 ved 21 °C

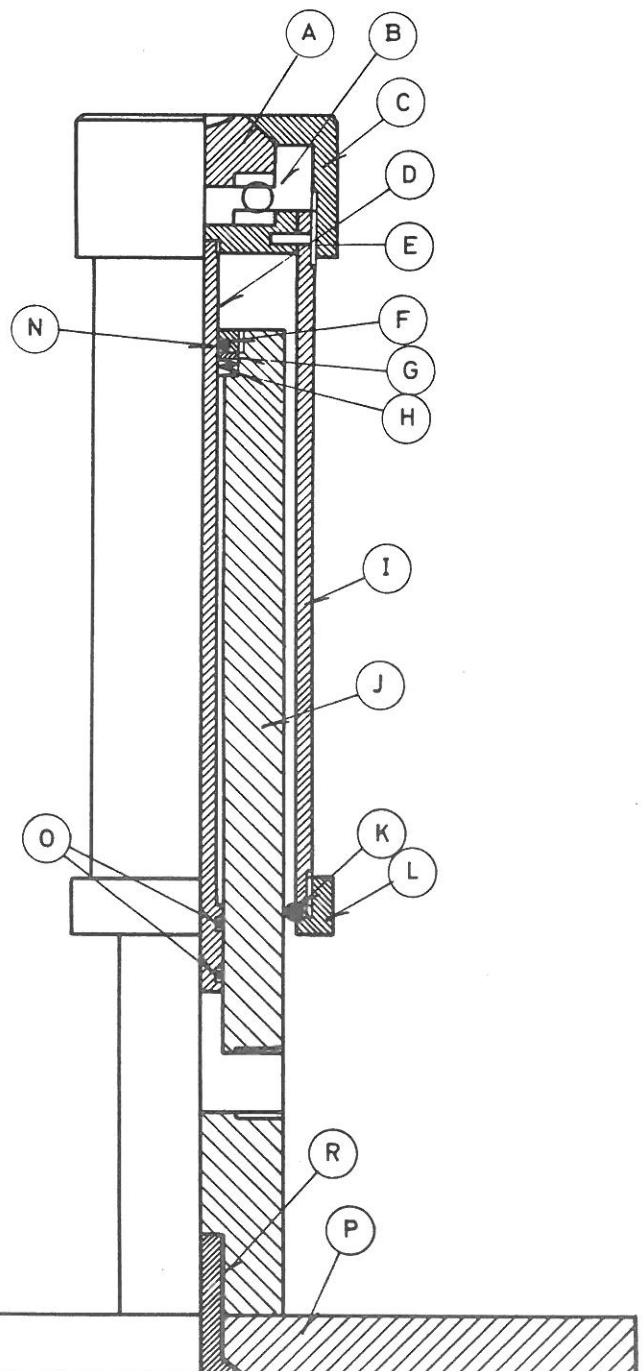
• P = 28.85 µstr = 130 kg
• ikke god

Aflæsning
500 1000 1500 µstr

GEOTEKNISK INSTITUT						
Boring no.:	Dybde:	m	Kote:			
Forsøg:	d.	Tegn.:	d.	Sag:		
Kontr.:	d.	Godk.:	d.	Lab. no.:	Forsøg no.:	Bilag no.: 39

Samletegning
1:1
alle mål i mm

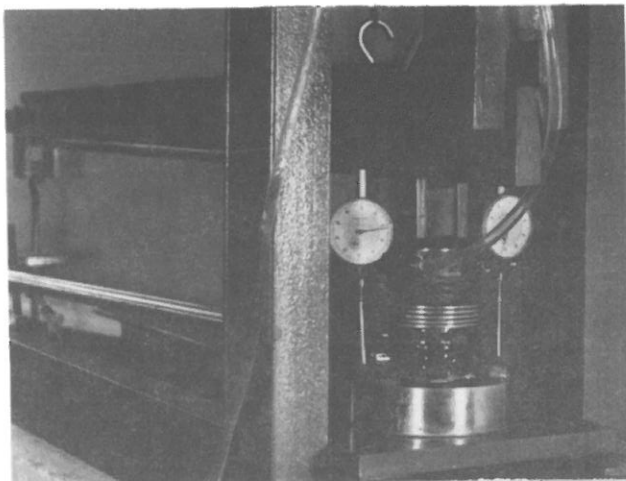
	Tegn. nr.	
A	2	Mat. Messing
B		SKF 51100 1stk
C	3	Messing
D	4	Stål
E	6	Stifter 3 stk
F	5	Messing
G	7	Ring 11×5.....1mm tyk
H	7	4 stk tallerkenfjedre
I	6	32×38 HL Messingrør.....120
J	7	28 ^a Messingstang170
K		31stk SKF-kugler 1/8"
L	8	Messing
N		1stk O-ring R 104
O		2stk O-ring R 102
P		150×150×10 jernplade
R		1stk 1/4" WG-skrue.....25



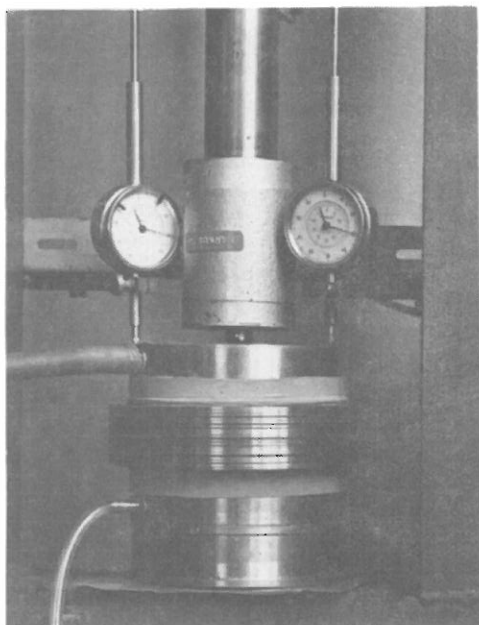
GEOTEKNISK INSTITUT				Celle i trykholder.	
Boring no.:	Dybde:	m	Kote:		
Forsøg:	d.	Tegn.:	d.	Sag: F 1/61	
Kontr.:	d.	Godk.:	d.	Lab. no.:	Forsøg no.: Bilag no.: 40

"HARMONIKA"-APPARAT, ANVENDT TIL GENNEMSTRØMNINGSFORSØG
omtales side 8-12

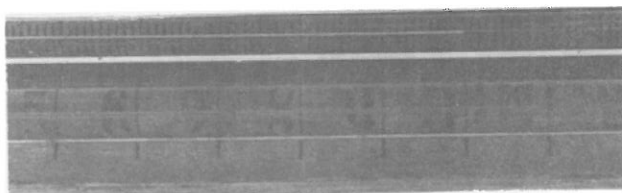
$A = 38,5 \text{ cm}^2$



$A = 158 \text{ cm}^2$



Kapillarrør



DET NYE KONSOLIDERINGSAPPARAT

$$A = 38,5 \text{ cm}^2$$

omtales side 18

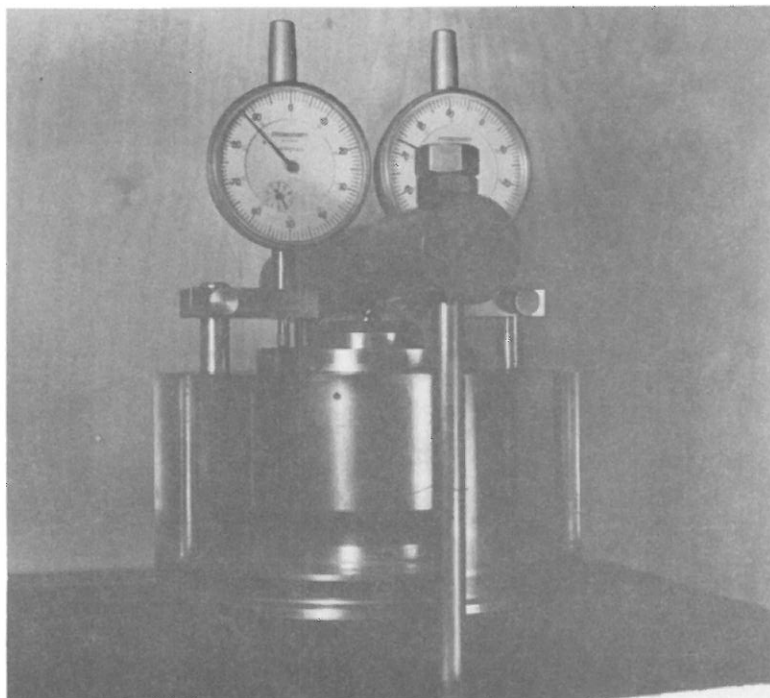
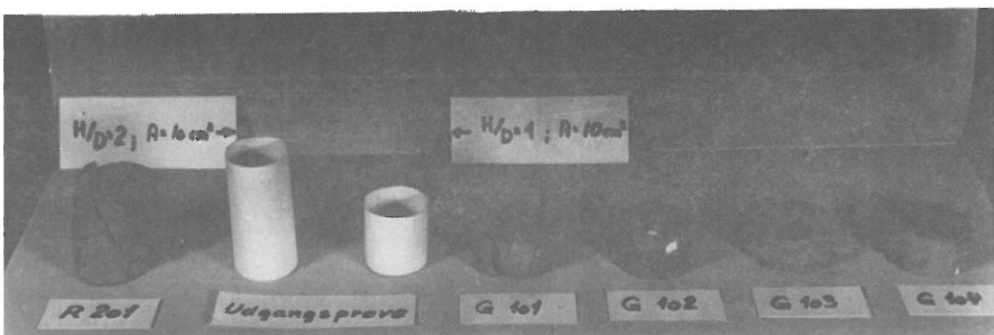


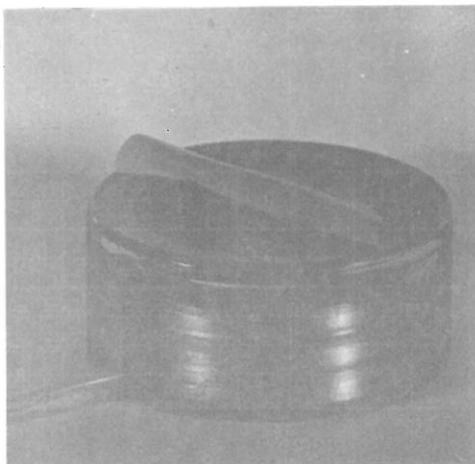
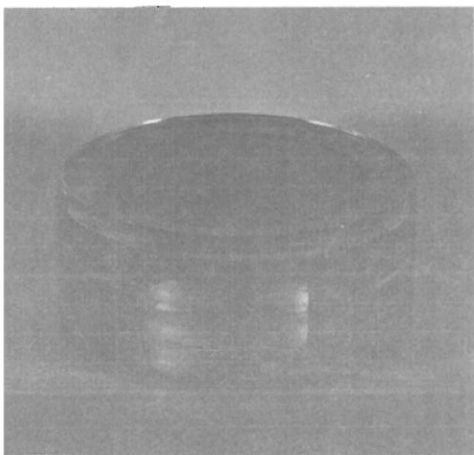
Foto no. 2.

SIMPLE TRYKFORSØG. PRØVER.

Forsøg på bilag 17-22. Omtales side 29-31



GLATTE TRYKHOVEDER, UDEN OG MED MEMBRAN
omtales side 43



PRØVER BENYTTET TIL KONSOLIDERINGSFORSØG OG TRIAXIALFORSØG.

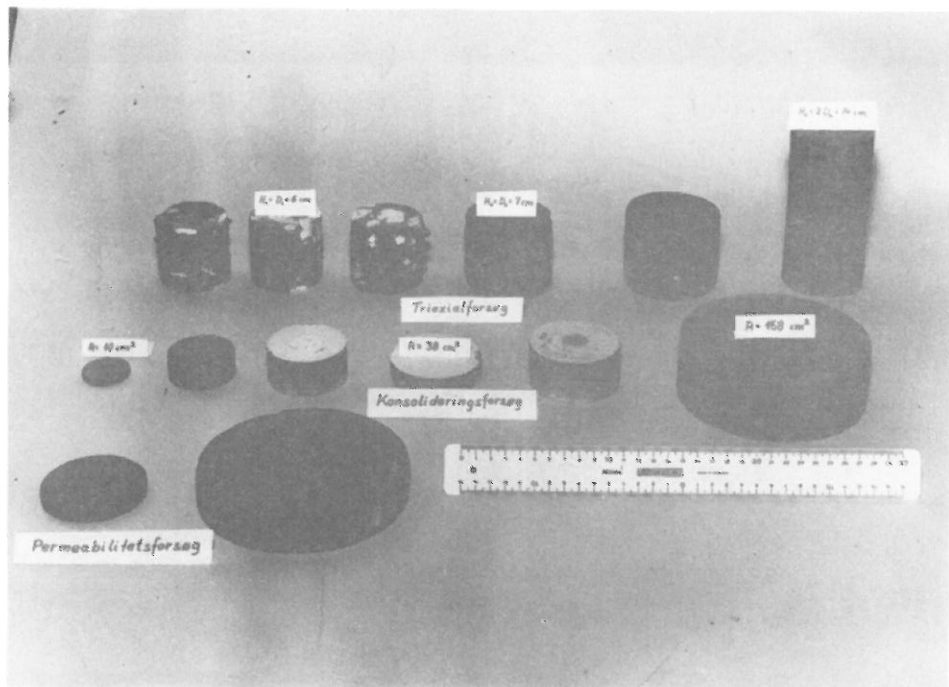


Foto no. 4.

PRØVE MED MANGE STEN.

KRATBJERG MORÆNE.

PÅSMURT MEMBRAN.

ontales side 45



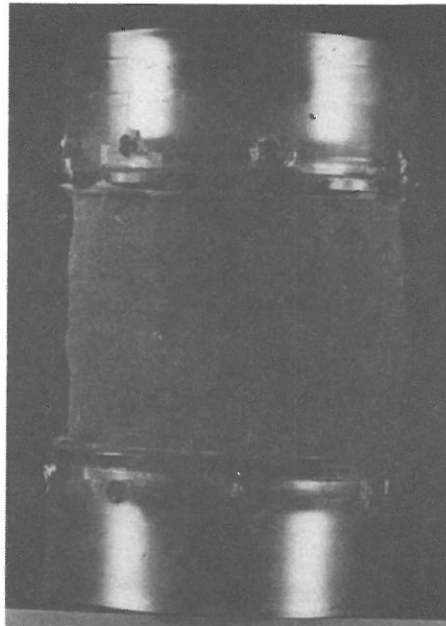


TRIAXIALPRØVE EFTER
BRUD.

RU TRYKHOVEDER

$H = 2D = 14 \text{ cm}$

side 39-41



TRIAXIALPRØVE EFTER
BRUD.

GLATTE TRYKHOVEDER

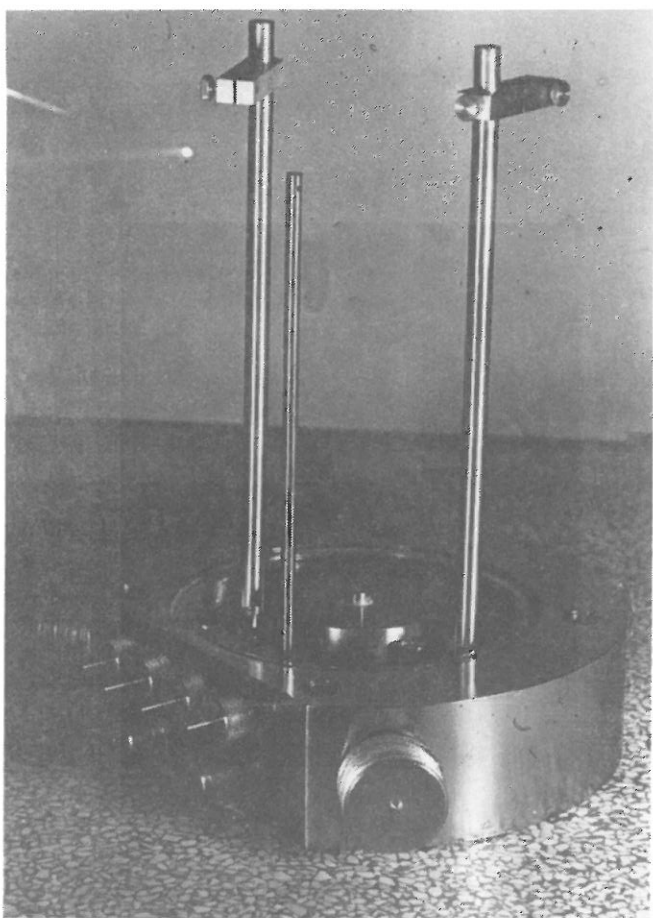
$\delta_r = 15 \%$

$H = D = 7 \text{ cm}$

side 39-41

TRIAXIALAPPARATETS BUND.

·bilag no 24



TRIAXIALAPPARATETS BUND MED PRØVE,
MÅLEURE OG OLIERØR.

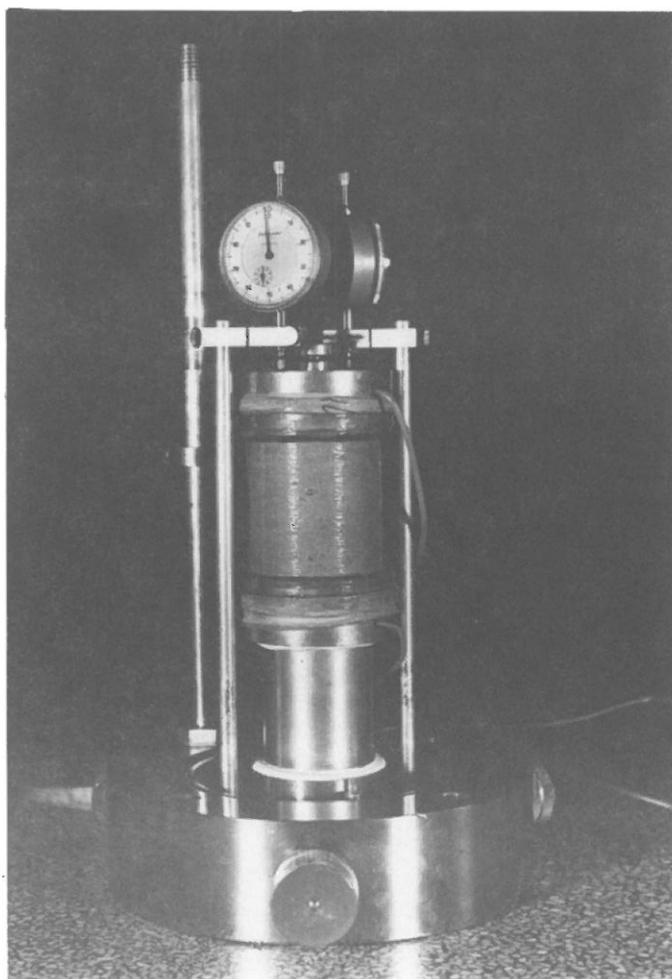
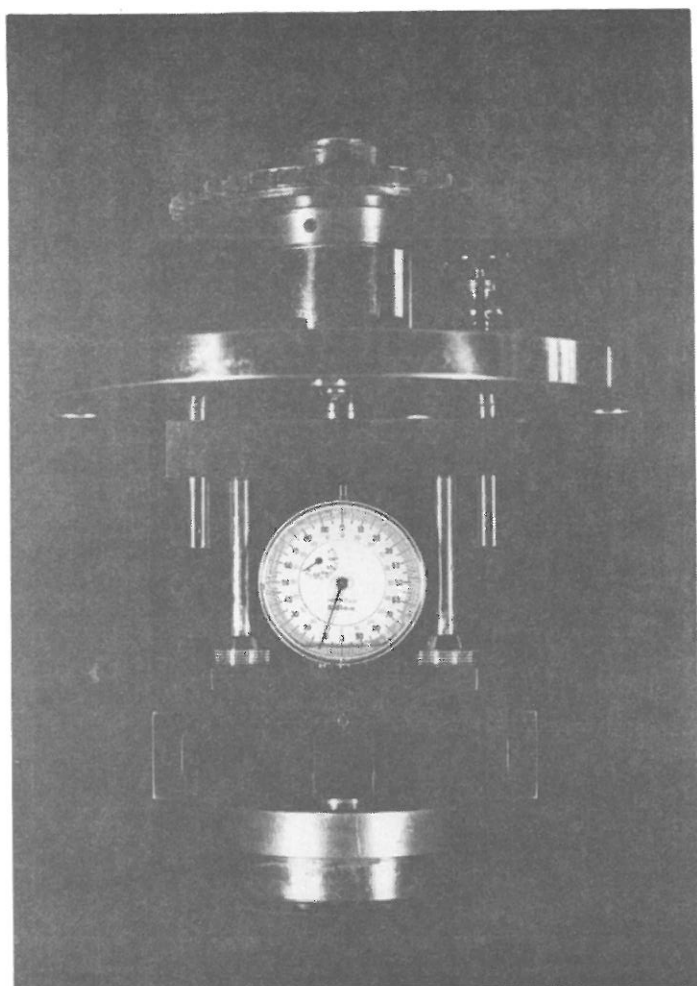


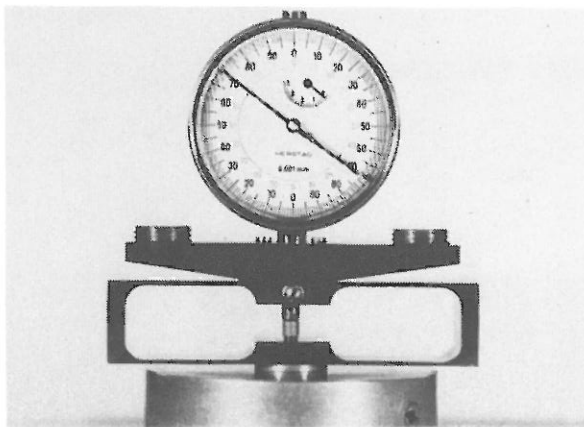
Foto no. 8.

TRIAXIALAPPARATETS TOPPLADE MED
KRAFTTRAMME.

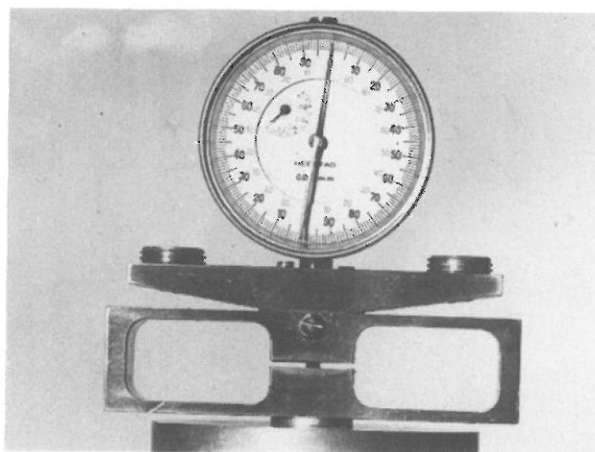


KRAFTTRAMMER.

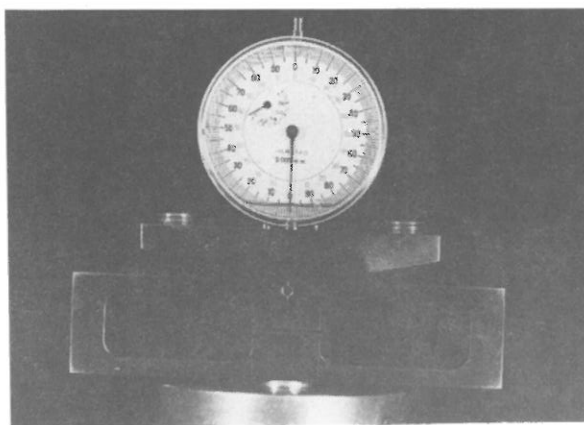
omtales side 48



- 50 kg



- 200 kg

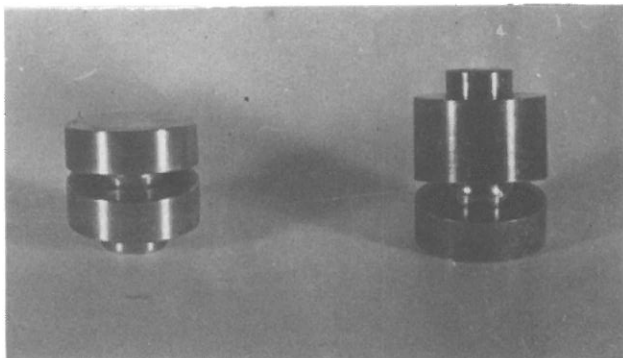


- 500 kg

Foto no. 10.

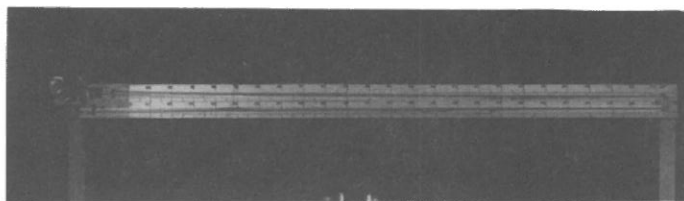
KUGLELED

omtales side 50



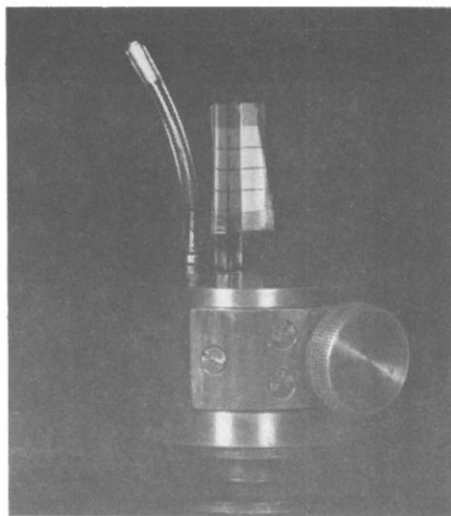
VOLUMENMÅLER

omtales side 50



KAPILLARRØR TIL $\text{Cu}_{u=0}$ -FORSØG

omtales side 51



TRIAXIALAPPARATETS YDRE SYSTEM

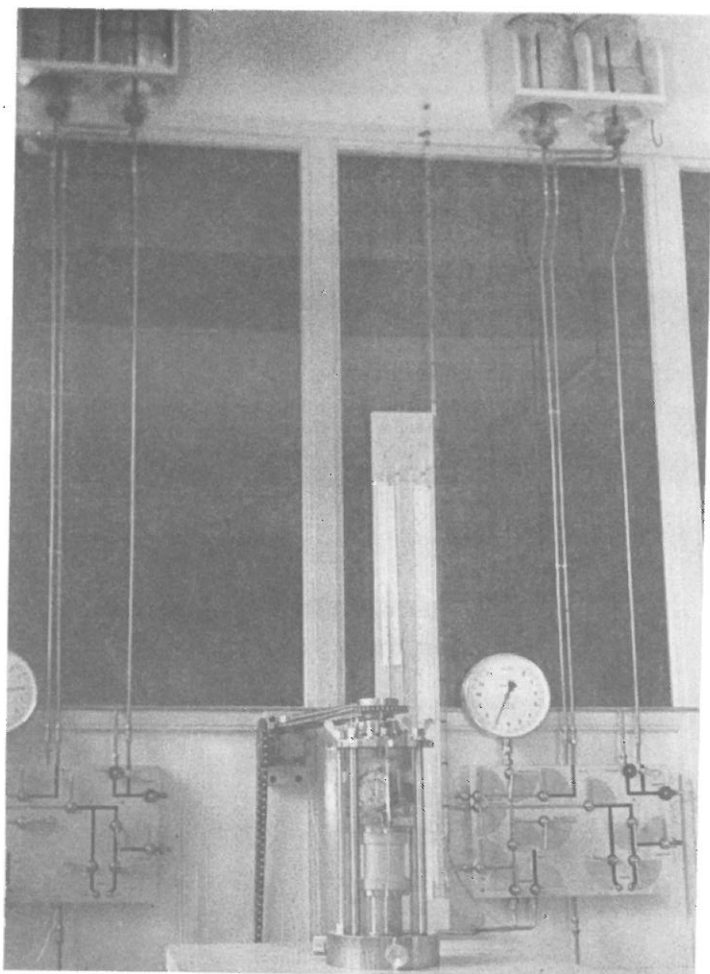
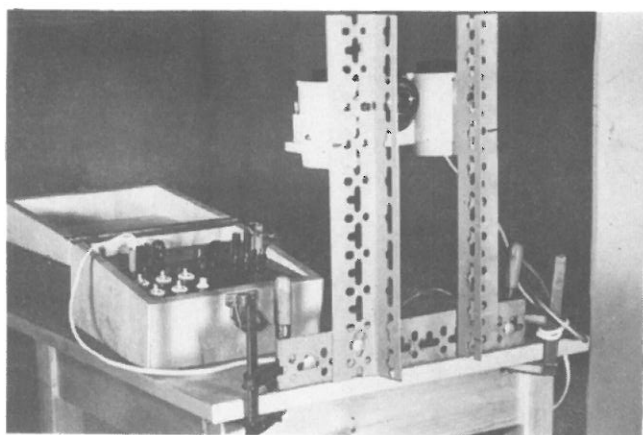
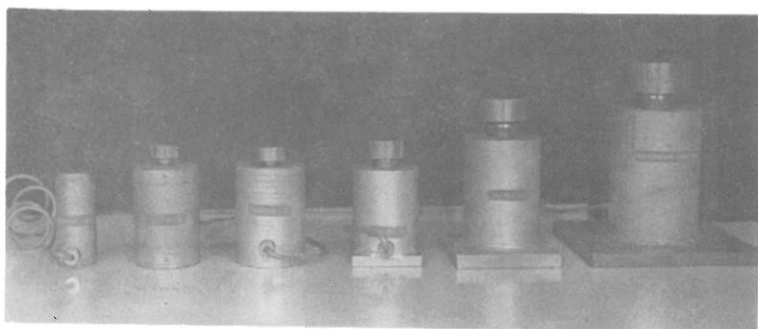


Foto no. 12.

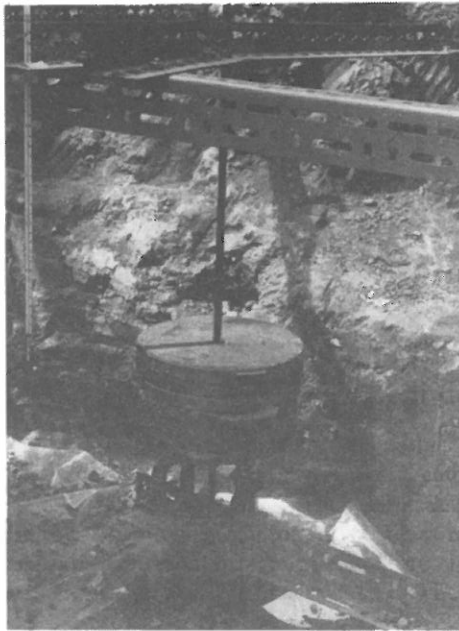
Schackmann fotoregistreringsudstyr



Trykdåser til markmålinger



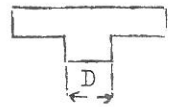
MARKFORSØG



Små plader ($D < 7,5$ cm)

Belastning med lodder
på stang

Pladens tværsnit:

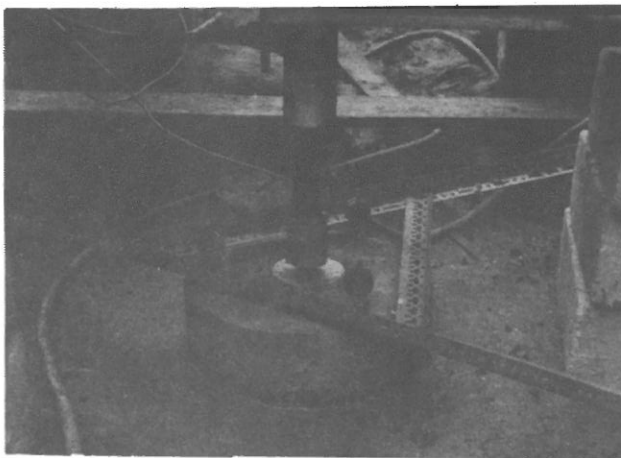


Større plader ($D = 7,5 - 15$ cm).
Belastning gennem vægtstang.



MARKFORSØG
DEFORMATIONSFORSØG

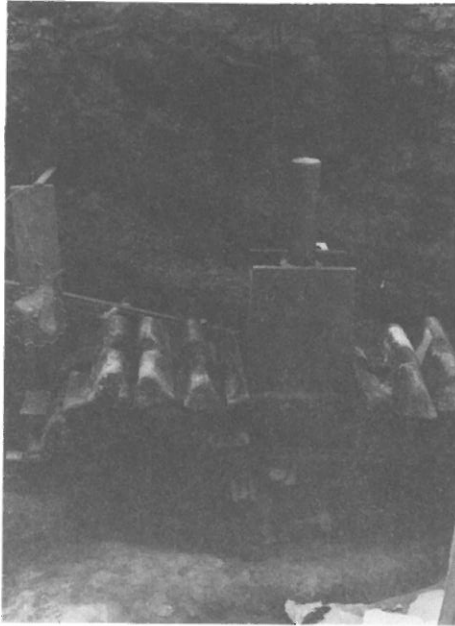
Store plader
Her $D = 50$ cm.
Belastning gennem
lonkraft og hydrau-
lisk trykholder.



Opstilling med
3 tons modhold.
Der ses hydraulisk
trykholder og
straingagesindikator
(sml. side 66)



MARKFORSØG
BRUDFORSØG



Små plader.
Markspindel.
Kraftramme og måleure ses.



Større plader ($D = 15 - 25 \text{ cm}$)
Jorden benyttes som modhold
Overfladelast skjuler pladen
Man kan se donkraften og
observationsrøret.
I baggrunden en oliepumpe, da
forsøget udførtes med kon-
stant hastighed i brud
(se side 64-67)